

Comportamiento de mezcla de concreto cemento Portland con adiciones de 5 y 10% de cenizas de lodos

Trabajo para obtener el título de Ingeniero Civil.



María Fernanda Pacheco Tuesca & Marledys Utria Lafaurie.
Junio 2019.

Universidad de la Costa.
Departamento de Ingeniería.
Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental
Barranquilla
2019

Comportamiento de mezcla de concreto cemento Portland con adiciones de 5 y 10% de cenizas de lodos

Asesores
Heidis Cano
Fabricio De Paoli

María Fernanda Pacheco Tuesca
Marledys Utria Lafaurie
Junio 2019.

Universidad de la Costa.
Departamento de Ingeniería.
Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental
Barranquilla
2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

Barranquilla, _____ 2019.

Dedicatoria

Dedicado en primer lugar al ser supremo de sabiduría, Dios, por desarrollar en nosotras las capacidades necesarias para sacar adelante este proyecto y nuestra carrera profesional.

A nuestra familia, motores principales, por su apoyo incondicional y apostarle a nuestro futuro.

Agradecimientos

Principalmente a Dios, por llenarme de sabiduría y paciencia durante estos 5 años de estudio. A mi familia en general, por apoyarme en mis decisiones y creer firmemente en mis capacidades. A los maestros que encontré en el camino, quienes inculcaron en mí no solo los conocimientos básicos sino también el amor y respeto por la profesión. En especial a mis tutores la Dra. Heidis Cano, el Ing. Fabricio De Paoli y la Ing. Yoleimi Ávila por acompañarnos y guiarnos en este proceso. Y a mis amigos y compañeros de estudio por ser un apoyo fundamental y ser parte de este logro.

María Fernanda Pacheco Tuesca

A Dios, a la Virgen María, por llenarme del espíritu santo en este tiempo de mi carrera profesional. A mi familia por ser apoyo incondicional y motivación, a cada uno de los docentes que aportaron a mi crecimiento personal y profesional, a mis tutores Ing. Fabricio De Paoli, Dra. Heidis Cano y la Ing. Yoleimi Ávila por guiarnos y ser apoyo fundamental para dar por finalizado este proyecto, a todas las personas que saben que desde los más pequeño hicieron posible este sueño, a mis amigos, a mis compañeros y conocidos. Gracias.

Marledys María Utria Lafaurie

Resumen

En el presente estudio se analizaron las cenizas del lodo procedente de las operaciones de potabilización de agua de la Planta de Tratamiento de la Triple A, en la ciudad de Barranquilla. Estos análisis, tienen por objeto determinar la utilidad de las cenizas de los lodos como posible aglomerante hidráulico en mezclas de concreto de cemento portland, generando una disposición ecológica de los mismos, y contribuyendo a minimizar la actividad de explotación de materias primas empleadas en la industria de la construcción. Se fabricaron especímenes con un reemplazo del 5% y 10% de cenizas de lodo, y una mezcla de control que debía cumplir con un esfuerzo a la compresión teórico de 4000 Psi (28MPa) para comparar los resultados y el comportamiento del concreto fabricado. Los estudios demostraron que las cenizas de lodos procedentes de la planta de tratamiento de agua potable se pueden remplazar en pequeños porcentajes dentro de las mezclas de concreto de cemento Portland, sin que se vea afectada negativamente la resistencia a la compresión. Se obtuvo que los especímenes ensayados a compresión logran alcanzar los 3000 psi, lo que corresponde a un concreto de resistencia moderada, el cual cumple con los requerimientos para ser empleado en construcción de edificaciones de tipo habitacional de pequeña altura y edificaciones sencillas.

Palabras clave: cenizas de lodo, material cementante complementario, concreto, resistencia a compresión

Abstract

In the present study the sludge ashes coming from water treatment operations of the treatment plant of Triple A company, in Barranquilla city are analyzed. These analyzes are intended to determine the usefulness of sludge as a hydraulic binder, creating an ecological arrangement of thereof, and helping to minimize the extractive activities of raw materials used in the construction industry. Specimens were manufactured with a 5% and 10% replacement of cement by sludge ashes and a control mixture that required a theoretical compression strength of 4000 Psi (28 MPa) to be compared with the results and behavior of the modified concrete. The results from this study showed that sludge ashes from the water treatment can be replaced in small percentages with the Portland cement in concrete mixture without negatively affecting the compressive strength. It was obtained that the specimens tested for compression reach 3000 psi, which corresponds to a concrete of moderate resistance, which meets the requirements to be used in the construction of buildings of small housing type and simple buildings.

Keywords: sludge ash, supplementary cementitious material, pozzolana, concrete, compressive strength

Contenido

Lista de tablas y figuras.....	9
1. Introducción.....	14
1.1. Justificación	17
2. Objetivos.....	19
2.1. Objetivo general	19
2.2. Objetivos específicos.....	19
3. Marco referencial	20
3.1. Marco teórico.....	20
3.1.1. Potabilización del agua	20
3.1.2. Generación de lodos.....	24
3.1.2.1. Contaminación producida por el mal manejo de lodos	24
3.1.2.2. Composición de los lodos producidos en plantas de tratamiento de agua potable	25
3.1.3. Componentes del concreto.....	26
3.1.3.1. Cemento.....	26
3.1.3.1.1. Tipos de cemento.	27
3.1.3.2. Agregados.....	28
3.1.3.3. Aditivos	29
3.1.4. Materiales cementosos complementarios	29
3.1.4.1. Cenizas Volátiles (FA)	30
3.1.4.2. Humo de Sílice (SF)	31
3.1.4.3. Escorias del alto horno	31
3.2. Estado del arte.....	33
4. Parte experimental.....	38
4.1. Lodo de PTAP VS Cenizas de lodo PTAP	38
4.1.2. Cenizas de lodo PTAP	39
4.2. Caracterización de los materiales	40
4.2.1. Caracterización de los agregados	40
4.3. Diseño de mezcla de concreto.....	42

4.3.1.	Cálculo del diseño de mezclas de concreto	43
4.3.1.1.	Resistencia requerida	43
4.3.1.2.	Selección del asentamiento	44
4.3.1.3.	Contenido de aire	45
4.3.1.4.	Cantidad de agua de mezclado	45
4.3.1.5.	Relación Agua/Material Cementoso (a/mc)	46
4.3.1.6.	Contenido de Cemento	48
4.3.1.7.	Contenido de agregado grueso	49
4.3.1.8.	Contenido de agregado fino	50
4.3.1.9.	Cantidad de material para 1m ³ de concreto	51
4.3.1.10.	Reemplazo de cemento por cenizas de lodo de PTAP	51
4.3.1.11.	Corrección por humedad del diseño de mezcla en estado seco	52
4.4.	Cantidad de especímenes	54
4.4.1.	Fabricación de concreto fresco- Fase 1	54
4.5.	Ensayo de resistencia a la compresión.....	56
4.6.	Ensayo de absorción en concreto endurecido	58
5.	Resultados y discusión.....	59
5.1.	Caracterización de los materiales.....	59
5.2.	Evaluación de la resistencia a la compresión vs Contenido de Ceniza de lodo... 66	
5.3.	Absorción	70
6.	Conclusiones	73
	Referencias.....	75
	Anexo 1 Cantidad de material.....	81
	Anexo 2 Datos ensayo de compresión	81
	Anexo 3 Figuras del ensayo de compresión.....	84

Listas de tablas y figuras

Tablas.

Tabla 1 Materiales Cementantes Suplementarios	30
Tabla 2 Resistencia promedio a la comprensión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra	43
Tabla 3 Resistencia teórica requerida para la mezcla de concreto portland a los 28 días.....	43
Tabla 4 Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y compactación.....	44
Tabla 5 Agua de mezclado	46
Tabla 6 Relación entre agua y material cementante resistencia a la compresión del concreto	47
Tabla 7 Datos interpolación Relación Agua/Cemento.....	47
Tabla 8 Volumen de agregado grueso (m^3) por unidad de volumen de concreto.....	49
Tabla 9 Datos de los agregados	49
Tabla 10 Volúmenes materiales que componen la mezcla de concreto.....	50
Tabla 11 Mezcla de concreto para un metro cúbico	51
Tabla 12 Cantidad de cemento y cenizas para 1 m^3 de concreto.....	52
Tabla 13 Pesos de los agregados húmedos.....	53
Tabla 14 Corrección agua de mezclado por humedad	53
Tabla 15 Mezcla de concreto para un metro cúbico con corrección de humedad.....	53
Tabla 16 Granulometría Agregado fino.	60
Tabla 17 Criterios SUCS para las arenas	61
Tabla 18 Resultados del ensayo de granulometría Agregado grueso.	62
Tabla 19 Criterios SUCS para Grava bien gradada	62
Tabla 20 Densidad y absorción del agregado fino NTC 237	63
Tabla 21 Peso específico y absorción del agregado grueso.	65
Tabla 22 Humedad agregado fino y grueso NTC 1776	66
Tabla 23 Promedios de Resistencia en Cilindros de concreto con diferentes adiciones de cenizas de lodo provenientes de PTAP	67
Tabla 24 Cálculo de Absorción de Concreto.....	71
Tabla 25 Cantidad de materiales utilizados para la fabricación de las mezclas	81

Tabla 26 Datos Cilindros mezcla de control	81
Tabla 27 Datos cilindros con 5% de cenizas de lodo de PTAP	82
Tabla 28 Datos cilindros con 10% de cenizas de lodo de PTAP	83

Figuras.

Figura 1. Planta de tratamiento de agua potable de Puerto Mallarino, Cali.	20
Figura 2. Proceso de Potabilización de agua.	21
Figura 3. Resalto hidráulico para la coagulación en PTAP "Las Flores Triple A" Barranquilla. .	22
Figura 4. Decantadores para la separación de los sólidos más densos en PTAP "Las flores Triple A" Barranquilla.	23
Figura 5. Cemento.	26
Figura 6. Cenizas Volantes.	30
Figura 7. Humo de Sílice.	31
Figura 8. Vista satelital de la PTAP Triple A.	38
Figura 9. A: Personal de la Triple A; B: Transporte del lodo en bolsas plásticas; C: Secado del lodo en la empresa Saybolt.	39
Figura 10. A: Maceración Manual del lodo, B: Tamizado del lodo por el tamiz N°40.	39
Figura 11. A: Horno Terrígeno Modelo MM20, B: Cenizas de lodo de PTAP.	40
Figura 12. Ensayo de Granulometría.	41
Figura 13. A: Peso de la muestra, B y C: Muestra pesada con el recipiente, D: Muestra pesada en inmersión, E: Muestra en absorción.	42
Figura 14. Mezcla con 10% de ceniza adicionada.	54
Figura 15. Vaciado de cilindros.	55
Figura 16. Curado de especímenes en el Tanque.	56
Figura 17. Esquema de los modelos de fractura típica.	57
Figura 18. A: Falla de la mezcla de Concreto con 100 % de cemento, B: Falla de la mezcla de concreto con 5% de cenizas, C: Falla de la mezcla de concreto con 10% de cenizas	58
Figura 19. Ensayo de absorción, A: Inmersión de probetas, B: Secado al horno.	59
Figura 20. Curva granulométrica Agregado fino.	61
Figura 21. Curva granulométrica agregado grueso.	63

Figura 22. Promedio de las resistencias	68
Figura 23. Porcentajes de resistencia	70
Figura 24. Ensayo de resistencia a la compresión cilindros de control a los 28 días.	84
Figura 25. Ensayo de resistencia a la compresión cilindros con 5% de cenizas de lodo a los 28 días.	84
Figura 26. Ensayo de resistencia a la compresión cilindros con 10% de reemplazo de cenizas de lodo a los 28 días.....	85

Glosario de abreviaturas.

A/C	Relación agua- cemento
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
Cr₂O₃	Trióxido de cromo
FA	Cenizas de lodo
GBSF	Escorias de alto horno
MCS	Material cementante suplementario
MF	Módulo de finura
NTC	Norma técnica colombiana
P₀	Probetas sin cenizas de lodo
P-10cl	Probetas con 10% de reemplazo de cenizas de lodo
P-5cl	Probetas con 5% de reemplazo de cenizas de lodo
PTAP	Planta de tratamiento de agua potable
SF	Humo de Sílice
SiO₂	Dióxido de Silicio
Ss	Desviación estándar
TMN	Tamaño máximo nominal

1. Introducción.

El proceso de potabilización de agua produce grandes volúmenes de lodos que representan de 1,5 al 2% del agua tratada (Gutiérrez-Rosero, Ramírez-Fajardo, Rivas, Linares, & Paredes, 2014), los cuales debido al mal manejo terminan siendo vertidos en lugares no aptos, como por ejemplo las fuentes hídricas. Esta situación produce un aumento en la contaminación de ríos, lagos, manglares, entre otros. Además de esto, los lodos vertidos contienen una gran cantidad de químicos que pueden causar un impacto negativo al medio ambiente (Daza Marquez & Medina Sanchez, 2018). En Colombia, la información publicada en torno a experiencias de reutilización y tratamiento de los lodos provenientes de PTAP es escasa. En tres PTAP de ciclo convencional de diferentes ciudades del país, se realiza el tratamiento de estos lodos donde prima el tratamiento físico por medio de la deshidratación, mientras que en el municipio de Caldas (Antioquia) cuenta con una planta piloto para el tratamiento de lodos donde se espesan por medio de polímeros hasta su secado para su posterior disposición (Gutiérrez-Rosero et al., 2014).

La Constitución Política de Colombia establece como uno de los fines principales de la actividad del Estado, la solución de las necesidades básicas insatisfechas, entre las que está el acceso al servicio de agua potable (Unicef, 2006). La demanda de agua potable, debida al crecimiento de la población, ha producido un aumento en la construcción de plantas de potabilización de agua, lo que conlleva al aumento de volúmenes de lodos producidos por este tratamiento. Este hecho ha desafiado a ingenieros e investigadores a encontrar métodos o procedimientos que faciliten la reutilización o la eliminación de estos residuos (Tafarel et al., 2016).

Por otra parte, es sabido que para la fabricación del cemento se necesitan como materias primas fundamentales la caliza y la arcilla, o también mezclas naturales de ambas (margas),

teniéndose que mantener en el producto final una combinación determinada de estos componentes para poder ajustarse a las prescripciones de calidad del producto. Estas materias primas se encuentran en la naturaleza, combinadas en forma muy diversa lo cual crea dificultades en su elaboración. Por lo tanto, en la automatización del proceso de fabricación es primordial considerar la heterogeneidad de las materias primas y calcular en consecuencia la mezcla de componentes. Esta materia prima se extrae comúnmente en canteras a cielo abierto lo que puede conllevar a que si se hace un mal procedimiento se produzca un desequilibrio en el ecosistema (Sterba, 2018).

El concreto, es hoy día uno de los materiales más utilizados debido a su versatilidad, facilidad de uso y características mecánicas para llevar a cabo todo tipo de procesos constructivos, lo que ha originado el aumento de la producción de cemento en un 6,3% (Castilla, 2018); según el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), en Colombia, en febrero de 2018 se despacharon al mercado nacional 950.500 toneladas de cemento gris y la producción fue 954.400 toneladas, y para finales de año este valor se habría incrementado a 1.094.300 toneladas de cemento producidas. Las diferencias observadas se han generado debido al crecimiento de la población, necesidad de infraestructura urbana y edificaciones, y el desarrollo económico. No obstante, el sector cementero aproximadamente representa el 90% de las emisiones mundiales de CO₂ en los procesos industriales (El Tiempo, 2016), y teniendo en cuenta que en las grandes ciudades el uso de cemento es indispensable para generar un mayor desarrollo, se ignora el hecho de que a partir de la producción de este se despliegan una serie de problemáticas que contribuyen a aumentar el porcentaje de contaminación atmosférica. A esto también se le suma otro tipo de problemáticas que también son causadas en el momento de la

fabricación de cemento, como la degradación ambiental en el área de canteras por la explotación continua de la materia prima (Naisma Hernández, Mayda Ulloa, Yuri Almaguer, 2014).

Analizando la situación del mal manejo de lodos que se da en Colombia (Fernández, 2003), la problemática presentada para la fabricación de cemento, y tomando como punto de referencia estudios sobre viabilidad y propiedades mecánicas de mezclas de concretos de cemento Portland modificados encontrados en investigaciones hechas en Brasil (Geyer, 2001), se pretende considerar en esta investigación a el uso de lodos como un posible conglomerante hidráulico en la fabricación de concreto, con el fin de reducir la producción de cemento que, además de utilizar recursos naturales para su producción, emiten gases que contaminan la atmósfera. Por tal motivo realizamos la siguiente pregunta: ¿la adición de cenizas de lodo provenientes de plantas de tratamiento de agua potable en mezclas de concreto modificará las propiedades mecánicas de este?

1.1. Justificación

El proceso de potabilización de agua es de vital importancia para el desarrollo de cualquier sociedad, y consiste en un conjunto de fases que permiten obtener como producto final el agua apta para el consumo humano. Durante este proceso se obtiene una gran cantidad de lodos 1,5 a 2% del volumen total del agua tratada (Gutiérrez-Rosero et al., 2014), los cuales provienen de la acumulación de materia orgánica en el agua bruta y la mezcla de químicos utilizados en el proceso de potabilización. En Colombia aún no se le da un manejo adecuado a estos lodos, los cuales llegan a acumularse en grandes cantidades al punto de reflejar una amenaza si se vierte en cualquier fuente hídrica (Fernández, 2003). En Colombia, la información publicada en torno a experiencias de reutilización y tratamiento de los lodos provenientes de PTAP es escasa. En tres PTAP de ciclo convencional de diferentes ciudades del país, se realiza el tratamiento de estos lodos donde prima el tratamiento físico por medio de la deshidratación, mientras que en el municipio de Caldas (Antioquia) se cuenta con una planta piloto para el tratamiento de lodos donde se espesan por medio de polímeros hasta su secado para su posterior disposición. Asimismo, han sido pocas las publicaciones para la reutilización y tratamiento de lodos provenientes de PTAP (Gutiérrez-Rosero et al., 2014).

El manejo de los lodos es complejo, debido a su composición. Contienen sustancias desagradables producidas por el agua no tratada, así como a su vez materia orgánica diferente de la original, pero que está sujeta a otros procesos y que la pueden volver desagradable. Se debe tener en cuenta que el lodo contiene una baja fracción de materia sólida, por lo que las operaciones y procesos para extraer el agua y disminuir la cantidad de residuo a tratar son de vital importancia, puesto que un aspecto importante a tener en cuenta es la eficiencia vs costo en el tratamiento y funcionamiento de la planta. Uno de los costos más importantes en el proceso de

disposición final del lodo es el transporte de grandes volúmenes de lodo, por lo que es necesario estudiar y encontrar la mejor disposición final, la misma que resulte sustentable con el ambiente y al menor costo posible (Bermeo Barreto & Idrovo Heredia, 2014).

Por otra parte, se considera al sector cementero como uno de los principales contaminantes debido a la cantidad de gases emitidos durante la fabricación de cemento, la explotación indiscriminada de canteras para obtener los agregados de este producto y el desgaste energético que se utiliza para la producción de este (El Tiempo, 2016).

Por tanto, la presente investigación propone un estudio para la utilización de cenizas de lodo provenientes de plantas de tratamiento de agua potable como material cementante complementario en la fabricación de concretos de cemento portland. La investigación busca desarrollar alternativas que puedan suplantar el uso de cemento portland o en su defecto disminuir las cantidades de este utilizadas para el diseño de mezcla del concreto, contribuyendo con la reducción de la emisión de dióxido de carbono, del gasto energético y del uso de recursos naturales. Además, se propone una alternativa de uso de este residuo en la industria de la construcción civil, evitando su deposición en vertederos.

El utilizar los lodos podría considerarse como una nueva forma de construcción ecológica, ya que, al convertirse en un innovador mecanismo de gestión, manejo y disposición de residuos, se fortalece un desarrollo sostenible, con un importante aporte en la disminución del uso de recursos naturales. Esto permite una mejora en la huella medioambiental, a través del uso de materias primas alternativas que minimizan el impacto y la producción de los principales gases causantes del calentamiento global. (Bermeo Barreto & Idrovo Heredia, 2014)-

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Analizar los efectos de las cenizas de lodo provenientes de una planta de tratamiento de agua potable en las propiedades mecánicas del concreto de cemento Portland.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los materiales utilizados en la fabricación de las mezclas de concreto.
- Realizar el diseño de mezclas de concreto con adición de cenizas de lodo.
- Determinar las propiedades del concreto fresco y la resistencia a compresión del concreto endurecido de mezclas de concreto con adición de cenizas de lodo.
- Analizar y comparar la variación de las propiedades de resistencia a compresión entre concreto convencional y concretos con cenizas de lodo.

3. Marco referencial

3.1. Marco teórico

El marco teórico, que se desarrolla a continuación, permite conocer los conceptos básicos necesarios para el entendimiento del desarrollo del proyecto de grado. Este apartado tiene como finalidad contextualizar la problemática que se desarrolla por el mal manejo de lodos provenientes de PTAP y crear una relación de estos con las mezclas de concreto de cemento Portland.

3.1.1. Potabilización del agua

Una planta de tratamiento de agua potable (PTAP), tiene como fin la producción de agua apta para el consumo humano. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra las características de infraestructura de una PTAP convencional.



Figura 1. Planta de tratamiento de agua potable de Puerto Mallarino, Cali. (Catorce6, 2017).

La potabilización del agua se logra a través de fases como la coagulación, decantación, sedimentación y filtración, con las cuales se busca reducir la contaminación del agua tomada en el punto de captación. La Figura 2 muestra las etapas de la potabilización del agua las cuales se explican brevemente a continuación.

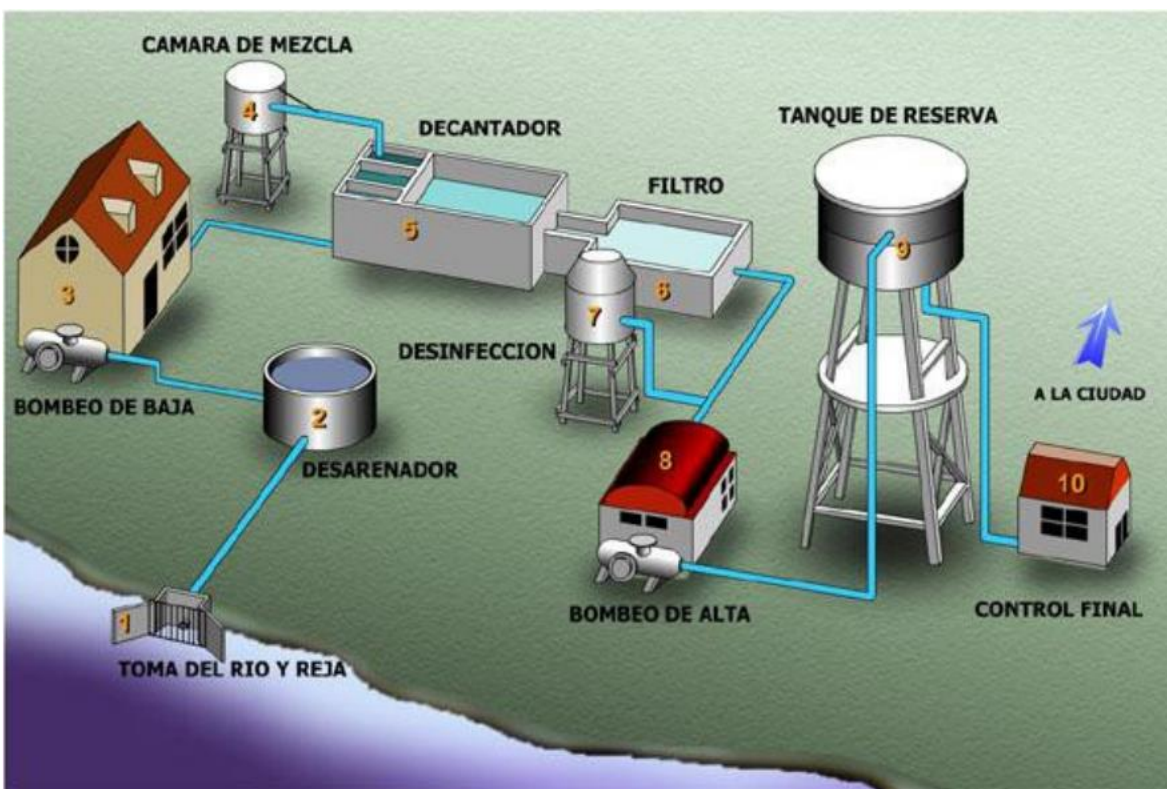


Figura 2. Proceso de Potabilización de agua. (Amaris & Rondo, 2009)

Captación: En esta primera fase el agua cruda es tomada de una fuente hídrica a través de una bocatoma que la lleva a una laguna o dársena. De allí el líquido pasa a una estación de bombeo para iniciar el proceso de clarificación de agua. De estas estaciones de bombeo el agua es impulsada a las plantas de tratamiento a través de tuberías de conducción de gran diámetro (TRIPLE A, 2017).

Coagulación- Floculación: Para remover los sólidos suspendidos, el agua debe ser sometida a varios procesos continuos que involucren mecanismos químicos y físicos. El proceso llamado coagulación, consiste en la adición de productos químicos coagulantes, que causan

desestabilización de las partículas coloidales, produciendo partículas llamadas flóculos, reacción que se produce en fracciones de segundo y con una fuerte agitación. La figura 3 muestra el resalto hidráulico que se emplea para lograr un mezclado rápido. Posteriormente, es adicionado en lenta agitación, otro producto químico, un polímero que actúa como floculante, el cual produce la agregación de los flóculos formando partículas de mayor peso y tamaño (macroflóculos) (TRIPLE A, 2017).



Figura 3. Resalto hidráulico para la coagulación en PTAP "Las Flores Triple A" Barranquilla. Adaptado de Fotografía de Marledys Utria. Barranquilla, 2018.

Sedimentación: El agua floculada pasa a las unidades de decantación o clarificación donde ocurre la separación de los sólidos más densos. Estas unidades son estructuras físicas que se clasifican en decantadores de flujo horizontal, de flujo ascendente, de manto de lodos y de recirculación de lodos como se muestra en la figura 4. En este punto del tratamiento del agua, se ha eliminado cerca del 75% de las impurezas biológicas e inorgánicas (TRIPLE A, 2017).



Figura 4. Decantadores para la separación de los sólidos más densos en PTAP “Las flores Triple A” Barranquilla. Adaptado de Fotografía de María Pacheco. Barranquilla, 2018.

Filtración: Posterior al proceso de clarificación se lleva a cabo la filtración del agua para eliminar todas aquellas partículas que no pudieron ser removidas en la decantación. Para la filtración del agua se emplean filtros de arena con lechos de grava (TRIPLE A, 2017).

Desinfección: El agua completamente transparente debe ser sometida al proceso de desinfección a fin de eliminar los microorganismos patógenos causantes de enfermedades, principalmente de tipo intestinal. La desinfección se realiza adicionando cloro al agua en la salida de las plantas, antes de llegar a los tanques de almacenamiento (TRIPLE A, 2017).

Alineamiento, bombeo, distribución: El agua potable es almacenada en depósitos o tanques de almacenamiento desde donde es bombeada a la red de distribución y a otras estaciones de rebombeo. Hacen parte del sistema de distribución grandes tuberías de conducción, tuberías de distribución y redes domiciliarias que finalmente llevan el agua potable a los usuarios (TRIPLE A, 2017).

3.1.2. Generación de lodos

El tratamiento de agua potable genera desechos o subproductos los cuales deben ser tratados para evitar acumulaciones y enfermedades en sus consumidores. Uno de los problemas más importantes en el tratamiento de agua con coagulación química es la generación de lodos, cuya disposición final es predominantemente en cuerpos de agua, afectando su calidad y usos potenciales; el uso productivo de lodos puede ayudar en la recuperación de los recursos naturales y disminuir la contaminación ambiental (Torres, Hernández, & Paredes, 2012).

Estudios realizados en la Universidad de Ciencia y Tecnología en Beijing, China, señalan que el drenaje de lodos de las unidades sedimentadoras representa el 1,5-2,0% del volumen total del agua generada en las PTAP (Li, Jiang, Wu, & Zhou, 2013a); por lo tanto, factores como la construcción y ampliación de las PTAP inciden directamente en la producción mundial de lodos que, para el año 1997, superaba las 10 mil t/día, haciendo que la implementación de las unidades de tratamiento sea limitada debida a sus altos costos de construcción, mantenimiento y operación, razones por las cuales el manejo y disposición final de estos lodos resulta ser un desafío (Li, Jiang, Wu, & Zhou, 2013b).

3.1.2.1. Contaminación producida por el mal manejo de lodos

Usualmente los lodos producidos en las PTAP se eliminan de manera arbitraria, y debido a costes económicos, no suelen ser utilizados. El manejo que se le ha dado a los lodos de plantas de tratamiento de agua potable van desde la coagulación química, que incluye el almacenamiento en lagunas por períodos de tiempo indefinidos, la incineración, espesamiento y deshidratación (O’Kelly, 2010), que permiten obtener reducciones de humedad entre 30-40 %, lo que produce una disminución en el volumen de este residuo (Zhao, 2003).

Para el tratamiento de aguas muy contaminadas se exige aumentar la dosis de coagulante lo que ocasiona que aumente la resistencia a la deshidratación mecánica de los lodos proporcionalmente con las dosis empleadas, convirtiendo al proceso de tratamientos de lodos algo complejo y costoso. En la mayoría de los casos, se vierten estos residuos en fuentes de agua superficial ya que estas resultan ser la alternativa de manejo más simple y rápida, y se ignoran los posibles problemas para el medio ambiente y la salud humana (Gutiérrez-Rosero et al., 2014).

3.1.2.2. Composición de los lodos producidos en plantas de tratamiento de agua potable

El lodo generado en las plantas de tratamiento de agua potable se compone de materia orgánica e inorgánica en estado sólido, líquido y gaseoso, cuya composición varía en términos de sus características físicas, químicas y biológicas. Los volúmenes residuales que se desperdician dependen de las unidades operativas involucradas en el tratamiento del agua y en la calidad del agua cruda. (Sales, De Souza, Dos Santos, Zimer, & Almeida, 2010)

Analizando las características fisicoquímicas, los lodos procedentes de las PTAP están compuestos fundamentalmente por las materias presentes en el agua bruta y que por oxidación, coagulación y precipitación han sido retenidos en los decantadores (sedimentadores) y filtros (desarenadores) así como por sustancias (óxidos e hidróxidos) procedentes del floculante y otros reactivos como cal, permanganato o carbón, que se han empleado en el tratamiento. Las sustancias contenidas en el agua bruta son generalmente inertes, por ejemplo, arcillas y arenas, además de orgánicas como el plancton y otros microorganismos. De aquí que las características de los lodos varíen en función de la calidad del agua bruta y del tratamiento de potabilización

aplicado a esta. Todos los lodos tienen un bajo contenido de sólidos (1-6 %), por ello la disposición de su pequeño contenido de sólidos requiere el manejo de un gran volumen de lodo.

El problema principal en el tratamiento de lodos radica por tanto en concentrar los sólidos mediante la máxima remoción posible de agua y en reducir su contenido orgánico. La cantidad de lodo producido es muy variable, dependiendo del proceso de tratamiento usado. El volumen de lodo depende principalmente de su contenido de agua y muy poco del carácter del material sólido. El contenido de agua se expresa normalmente como porcentaje en masa; por ejemplo, un lodo con 90% de humedad contiene un 90 % de agua en masa y un 10% de sólidos en masa (Aldana Tique, 2017).

3.1.3. Componentes del concreto

3.1.3.1. Cemento

El cemento se puede precisar como una mezcla de Calizas y arcillas calcinadas. Que después de un debido proceso de molienda, adquiere propiedades adherentes. Es considerado la materia prima más importante para el sector de la construcción. (Demanda, Carlos, & Alcaraz, 2008). La apariencia visual del cemento se pueden observar en la figura 5. Aparentemente se percibe una sustancia de color grisáceo la cual su mayor característica es la finura de su grano.



Figura 5. Cemento. (Amaris & Rondo, 2009)

3.1.3.1.1. Tipos de cemento.

El cemento se clasifica en diferentes tipos teniendo en cuenta la dosificación de su materia prima utilizada al momento de su fabricación. Los tipos de cemento más conocidos en Colombia son (Norma Técnica Colombiana 121, 2014)

- Tipo UG – Uso General: Es utilizado en construcciones generales, cuando uno o más de los tipos especiales no son requeridos y cuando los elementos no van a estar expuestos al contacto con agentes agresivos, como por ejemplo sulfatos presentes en el suelo o en el agua, o a concretos que tengan un aumento considerable de su temperatura debido al calor generado durante la hidratación. Entre sus usos frecuentes se encuentran: pavimentos, pisos, edificios de concreto reforzado, puentes, estructuras para vías férreas, tanques y depósitos, tuberías, mampostería y otros productos de concreto reforzado.
- Tipo ART – Alta resistencia temprana: Normalmente este tipo de cemento desarrolla altas resistencias en una semana o menos. Contiene partículas que han sido molidas más finamente y se utiliza para la elaboración de concretos y morteros en plantas concreteras y centrales de mezclas, construcciones con producción industrializada de concretos, estructuras de concreto con requisitos de rápida puesta en servicio, producción de concreto para alta solicitudes estructurales y desempeño en ambientes agresivos dependiendo del tipo y la cantidad de adición que se utilice.
- Tipo MRS – Moderada resistencia a los sulfatos: Se utiliza para elaborar concretos con requerimientos de desempeño moderados en resistencias a la compresión y resistencias a los sulfatos. Se utiliza en ambientes moderadamente agresivos y en producción de concretos para cimentaciones, muros, contenciones, estructuras, rellenos y todo tipo de obra en general.

- Tipo ARS – Alta resistencia a los sulfatos: Se utiliza para la elaboración de concretos para ambientes agresivos (con presencia de sulfatos en suelos o en agua de mar), como por ejemplo canales, alcantarillas, obras portuarias y plantas de tratamiento de aguas, entre otras. Su resistencia se adquiere más lentamente que la de un cemento UG.
- Tipo MCH – Moderado Calor de Hidratación: Desarrolla resistencia a una velocidad muy inferior a la de otros tipos. Se usa para desarrollar concretos con requerimientos de desempeño moderados en calor de hidratación y la construcción de puentes y tuberías de concreto.
- Tipo BCH – Bajo calor de hidratación: Es utilizado para proyectos en los que se requiere bajo calor de hidratación donde no se deban producir dilataciones durante el fraguado, ni retracciones durante el secado; para estructuras de concreto masivo, en construcciones de estructuras de gran volumen como presas de gravedad, muros y diques, donde el aumento de temperatura resultante en el transcurso del endurecimiento se tenga que conservar en el menor valor posible.

3.1.3.2. Agregados

El agregado es el material granular, tal como-la arena, la grava, la piedra triturada o la escoria de acero de alto horno, la cual además puede ser utilizada por un medio cementante para formar concreto o mortero de cemento hidráulico. El término agregado grueso, se refiere a las partículas de agregado mayores de 4,75 mm (Malla No.4) y el término agregado fino, se refiere a las partículas de agregado menores de 4,75 mm, pero mayores de 75 μ m (Malla No. 200). La grava es el agregado grueso que resulta de la desintegración natural y de la abrasión de la roca o del procesamiento de conglomerado de adherencia débil. El término arena es utilizado para el agregado fino que resulta de la desintegración natural y de la abrasión de la roca o del procesado

de piedra caliza deleznable. La piedra triturada es el producto que resulta del triturado industrial de piedras bola, de rocas, de grandes pedruscos. La escoria de alto horno, un subproducto de la industria del acero, el cual es el material que se obtiene al triturar escoria de alto horno solidificada bajo condiciones atmosféricas (Monteiro & Mehta, 2004).

3.1.3.3. Aditivos

Los aditivos se definen como materiales diferentes a los agregados, el cemento y el agua, que se agregan a las mezclas de concreto antes o durante el mezclado. El uso de aditivos en el concreto es muy extenso en la actualidad debido a los muchos beneficios que se obtienen en su aplicación. Por ejemplo, los aditivos químicos pueden modificar el fraguado y las características de endurecimiento de la pasta de cemento al influir en la velocidad de hidratación de éste. Los aditivos para la reducción de agua pueden hacer más plástica la mezcla de concreto fresco al reducir la tensión superficial del agua; los aditivos para incluir aire pueden mejorar la durabilidad del concreto expuesto a climas fríos, los aditivos minerales como las puzolanas (materiales que contienen sílice reactivo) pueden reducir el agrietamiento térmico en el concreto masivo (Monteiro & Mehta, 2004).

3.1.4. Materiales cementantes complementarios

Los cementos adicionados (también llamados cementos compuestos, mezclados o a base de portland) están formados por cemento portland o Clinker, mezclado o molido juntamente con uno o varios materiales conocidos como adiciones. Las adiciones más conocidas son presentadas en la Tabla 1 (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2017).

Tabla 1

Materiales Cementantes Suplementarios

Adicción	Carácter	Reactividad
Escoria granulada de horno de fundición (GBFS)	Artificial	Hidráulica
Ceniza volante (FA)	Artificial	Puzolánica
Humo de sílice (SF)		
Ceniza de cascarilla de arroz (RHA)		
Cenizas volcánicas	Natural	
Pumice Volcánico		
Filler	Artificial	No activa

Nota: Fuente: Elaboración de (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2017).

3.1.4.1. Cenizas Volantes (FA)

La Norma Técnica Colombiana (NTC) define a las cenizas volantes como un residuo finamente dividido que resulta del proceso de combustión de carbón granulado o pulverizado y que es transportado por los gases de combustión (Técnica, Volantes, & Naturales, 2017).

Las cenizas volantes como se observa en la Figura 6 también pueden ser obtenidas como residuos de procesos comunes como de la producción de energía eléctrica a partir de centrales termoeléctricas que emplean carbón, como combustible. Estas partículas finas se obtienen por precipitación mecánica o electrostática del polvo en suspensión comprendido en los gases procedentes de la combustión (Centro de estudios y experimentación de obras públicas, 2011b).



Figura 6. Cenizas Volantes. (Centro de estudios y experimentación de obras públicas, 2011b)

3.1.4.2. Humo de Sílice (SF)

El humo de sílice es un producto inorgánico constituido por partículas esféricas de gran finura, que se origina en la reducción del cuarzo con carbón durante los procesos de obtención de silicio metal y ferrosilicio en hornos eléctricos de arcos. El polvo, como se muestra en la Figura 7, se recoge en filtros de mangas constando de partículas esféricas de SiO_2 amorfo en un porcentaje variable entre un 85% y 98% (Centro de estudios y experimentación de obras públicas, 2012).



Figura 7. Humo de Sílice. (Centro de estudios y experimentación de obras públicas, 2012)

3.1.4.3. Escorias del alto horno

Dentro de una fábrica de siderurgia integral el alto horno es la instalación base para la obtención de arrabio, lo cual constituye la materia prima de la fabricación del acero. El horno alto es un horno de cuba en el cual se introduce un gas reductor a presión, generalmente CO por la parte inferior, y una carga de materia generalmente constituida por minerales de hierro, coque y fundentes por la parte superior. Se separan dos productos: el hierro y las impurezas con los fundentes (escoria primaria), que van evolucionando en su composición hasta llegar a la parte baja del horno. La escoria que sale por la piquería del horno a una temperatura cercana a los

1500°C se considera como escoria de alto horno granulada. Las GBFS son materiales muy utilizados como adición activa para la elaboración de distintos cementos comerciales. Estos cementos siderúrgicos tienen algunas propiedades y características, tales como menor calor de hidratación, alta resistencia a los sulfatos y al agua de mar (Centro de estudios y experimentación de obras públicas, 2011a).

3.1.4.4. Cenizas de Lodo provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

Las cenizas de lodo provenientes de planta de tratamiento de aguas residuales se conocen como el subproducto obtenido de la incineración de lodos residuales mecánicamente deshidratados. Se pueden producir morteros de buena resistencia utilizando una pequeña cantidad de SSA para reemplazar el cemento. Sin embargo, la información sobre cómo la SSA residual afecta las propiedades del cemento del mortero, es limitado dado que las actividades puzolánicas de la mayoría de SSA son modestas. Posteriormente en la incorporación de desechos como la SSA junto con agregados de construcción y demolición reciclados (RCD), en la fabricación de bloques de concreto se obtiene que las SSA aumenta la resistencia a la compresión a largo plazo y reduce la contracción por secado. Por su parte la relación álcali-sílice causada por la GC reactiva podía ser suprimida con la incorporación de la SSA. Las pruebas de lixiviación realizadas también mostraron el cumplimiento de los límites reglamentarios (Li et al., 2013b)

3.2. Estado del arte

El uso de materias primas finitas y su impacto ha llevado a la búsqueda de materiales alternativos que puedan reutilizarse en la industria de la construcción (de Oliveira Andrade, Wenzel, da Rocha, & da Silva, 2018). En Brasil, la producción de lodo por tratamientos de agua potable ha aumentado en estos últimos años, y la falta de métodos para la eliminación de este ha producido que se genere una investigación a fondo sobre las propiedades que lo componen. En un estudio, en el cual se evaluó de la posibilidad de reciclar los lodos de plantas de tratamiento de agua y residuos de demolición en la construcción, el lodo de las PTAP resultó ser una alternativa viable de reciclaje desde el punto de vista de la resistencia a la compresión axial, módulo de elasticidad, absorción de agua y resistencia a la tracción según el método de prueba brasileño (Sales & de Souza, 2009).

En un diseño de mezcla tradicional, el concreto que está conformado por cemento, arena, compuesto y masa de agua, mantiene una relación en volumen de 1:2,5:0,67:0,6 respectivamente. Permitió obtener una resistencia a la compresión axial de 11,1 MPa, una resistencia a la tracción diametral de 1,2 MPa, absorción de agua de 8,8% y una densidad de 1.847 kg/m³. Estas propiedades mecánicas obtenidas hacen que el concreto sea adecuado para su aplicación en elementos no estructurales, mientras que el concreto de referencia hecho con agregados naturales mostró una resistencia a la compresión axial de 18-25 MPa y un valor medio de 20,9 MPa, caracterizándolo como concreto de mediana a baja resistencia (Sales, De Souza, & Almeida, 2011).

En la realización de concreto con lodos de PTAP y aserrín, se evaluaron las propiedades térmicas y se observó que el hormigón producido con el compuesto ligero presentó un conjunto de propiedades térmicas adecuadas para la aplicación de este en elementos de sellado no

estructurales. Además, el compuesto se puede usar para producir bloques y para rellenar losas. Estas aplicaciones pueden reducir el peso de los edificios y aumentar el confort térmico (Sales et al., 2010).

Por otra parte, una investigación realizada en la Universidad de la Costa, ubicada en Colombia, afirma que los óxidos presentes en los lodos con el contenido de los óxidos presentes en el cemento especificados en las normas internacionales, los porcentajes de MgO y SO_3 cumplen para lo establecido en la norma ASTM C150. El material presenta características puzolánicas clase F con bajos contenidos de CaO , por lo que los lodos provenientes de PTAP estudiados pueden poseer algunas propiedades cementantes, según la norma ASTM C618. Considerando la composición química de los lodos provenientes en PTAP, por ello puede el lodo calcinado emplearse como material cementante suplementario, en proporciones óptimas de manera que no afecte las propiedades físicas del concreto o mortero. Debido al bajo contenido de CaO en los lodos provenientes de PTAP, se recomienda evaluar el uso del material como mortero, ya que demanda menores valores de resistencia a la compresión. (Pacheco Jimenez & Varela Gomez, 2019)

En otros estudios realizados al mortero fabricado con cenizas de lodo producido en PTAP, se hizo un análisis a las propiedades mecánicas tales como resistencia de unión, resistencia a compresión, resistencia a la flexión y durabilidad (absorción de agua), y a su vez un análisis microestructural. Para este análisis microestructural se utilizaron morteros de revocación con diferentes niveles de reemplazo 2,5%, 5%, 7,5% y 10 % en peso de arena natural por agregado de lodo de tratamiento de agua, concluyendo que la densidad aparente de los morteros con cenizas de lodo disminuyó al aumentar la relación de reemplazo. Además, la absorción de agua de los morteros aumentó con el aumento en la relación de reemplazo. En cuanto a las

propiedades mecánicas, la resistencia a la compresión de morteros con cenizas de lodo fue ligeramente menor que la de los morteros de referencia. La resistencia a la flexión de estos morteros no mostró diferencia significativa en relación con la fuerza de la referencia morteros tradicionales (de Oliveira Andrade et al., 2018).

En investigaciones realizadas por el departamento de química de la Universidad de Jeddah, se evaluó la posibilidad de utilizar residuos de lodo de plantas de tratamiento de agua para la fabricación de ladrillos, utilizando como aditivo nano polvos de minerales, este en un 5% de masa constante. Los ladrillos se formaron en cuerpos cilíndricos mediante un prensado hidráulico. Después del secado, los ladrillos fueron sometidos a diferentes temperaturas de cocción; en cuanto a las propiedades mecánicas de los ladrillos cocidos se probaron de acuerdo con las especificaciones estándar internacionales. Los resultados indicaron que la muestra que contiene aditivo nano en polvo, especialmente Cr_2O_3 , exhibe una mejora pronunciada en sinterización y propiedades mecánicas en comparación con el blanco. Por lo tanto, el uso de lodos en la fabricación de ladrillos es una opción para el desarrollo sostenible básico, que proporciona beneficios ambientales y económicos. Los resultados de estos estudios también muestran que la producción de ladrillos con el lodo de la planta de tratamiento de agua es factible y prometedora, ya que se pueden usar directamente sin trituración adicional y a una temperatura de cocción relativamente baja (Torres et al., 2012).

Con un lodo obtenido de una planta de tratamiento de agua del área metropolitana de Curitiba se propuso introducir el lodo húmedo en matrices de concreto. Para la investigación se realizó un concreto de referencia sin adicción de lodo, y otros cuatro concretos con contenido de lodo de 3%, 5%, 7% y 10% en reemplazo en masa del agregado fino. Como resultados en pruebas de resistencia a la compresión, las mezclas que contienen hasta 5% de lodo presentaron

un f_{c28} mayor a 25 MPa. Para contenido de lodo superior al 5%, el f_{c28} fue menor, especialmente para el concreto con un 10% de reemplazo. Se concluyó que las mezclas con hasta 5% de lodo de plantas de tratamiento de agua potable pueden emplearse en aplicaciones que van desde la fabricación de artefactos de concreto y ladrillos para la construcción de pisos de concreto de cemento Portland. El uso de más del 5% de lodo en concreto está restringido a aplicaciones donde la trabajabilidad del concreto no es un parámetro requerido, como pavimentos residenciales, aceras y pisos (Sales et al., 2010).

En el caso de Colombia aún no se han implementado técnicas oficiales para darle un nuevo manejo a los lodos provenientes de PTAP, pero esta temática ha sido objeto de investigación en algunas universidades del país. Por ejemplo, la Universidad de la Salle realizó una caracterización de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de agua potable de Tolima, y se logró determinar el potencial de aprovechamiento de los lodos residuales por medio de caracterizaciones fisicoquímicas y microbiológicas en comparación con el Decreto 1287 del 2014. Se demostró que los lodos de la PTAP de El Espinal son aptos para su aprovechamiento como insumo para materiales de construcción; esto debido a que se incurriría en menos costos asociados al transporte y construcción de infraestructura, ya que se evidencio en las caracterizaciones fisicoquímicas (metales) que el aluminio es el metal más prevalente en los lodos residuales dado el uso del coagulante poli cloruro de aluminio, es decir, los lodos generados en la PTAP de El Espinal son lodos aluminosos. El aluminio es muy importante para la resistencia de los materiales de construcción, lo que para este caso indica una fuerte inclinación a esta alternativa de aprovechamiento, además que permite el encapsulamiento de este metal y mitiga el riesgo de exposición al mismo (Aldana Tique, 2017). Esto confirma que el lodo puede ser un material de remplazo viable en la fabricación de concreto de Cemento

Portland, permitiendo disminuir los porcentajes de cemento utilizados en los diseños de mezcla tradicionales.

4. Parte experimental

4.1. Lodo de PTAP VS Cenizas de lodo PTAP

4.1.1. Lodos de PTAP

La muestra de lodo fue extraída de los decantadores auxiliares que hacen parte de la PTAP de la TRIPLE A, ubicada en el barrio las Flores (Figura 8) a orillas de la desembocadura del Rio Magdalena. Seguidamente esta fue transportada en bolsas de plástico hasta la empresa Saybolt, en donde se expuso a un secado al sol por 24 horas a una temperatura promedio de 27°C como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.c.** Posteriormente, el material fue triturado y clasificado a través del Tamiz #40 como se muestra en la Figura 10. La muestra de lodo de la PTAP presentaba una humedad natural del 94% el cual fue calculado al finalizar la etapa de secado al sol de la muestra de lodo.



Figura 8. Vista satelital de la PTAP Triple A. Adaptado de Google Earth.

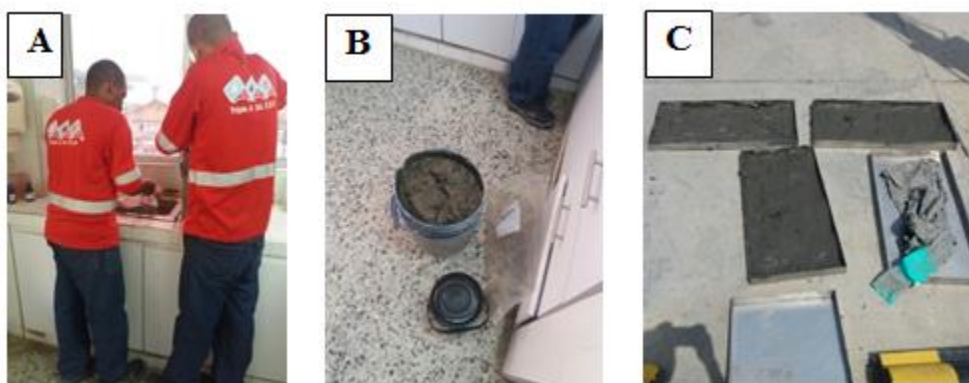


Figura 9. A: Personal de la Triple A; B: Transporte del lodo en bolsas plásticas; C: Secado del lodo en la empresa Saybolt. Nota. Fuente: Elaboración propia (Utria Marledys, Pacheco María)

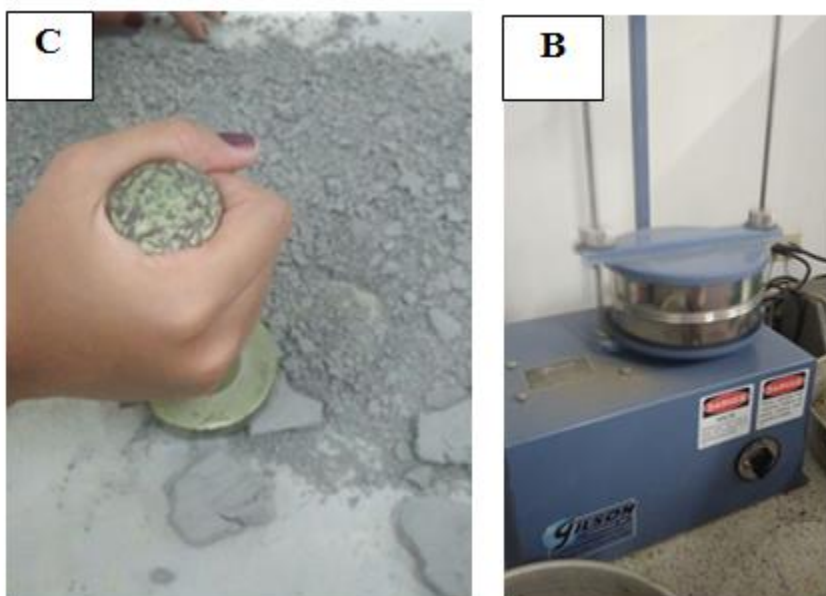


Figura 10. A: Maceración Manual del lodo, B: Tamizado del lodo por el tamiz N°40. Nota. Fuente: Elaboración propia (Utria Marledys, Pacheco María)

4.1.2. Cenizas de lodo PTAP

El lodo una vez triturado fue llevado al horno marca Terrigeno Modelo MM20 (ver Figura 11A), a temperatura de 800°C durante tres horas, para la obtención de las cenizas de lodos de PTAP (ver Figura 11B).

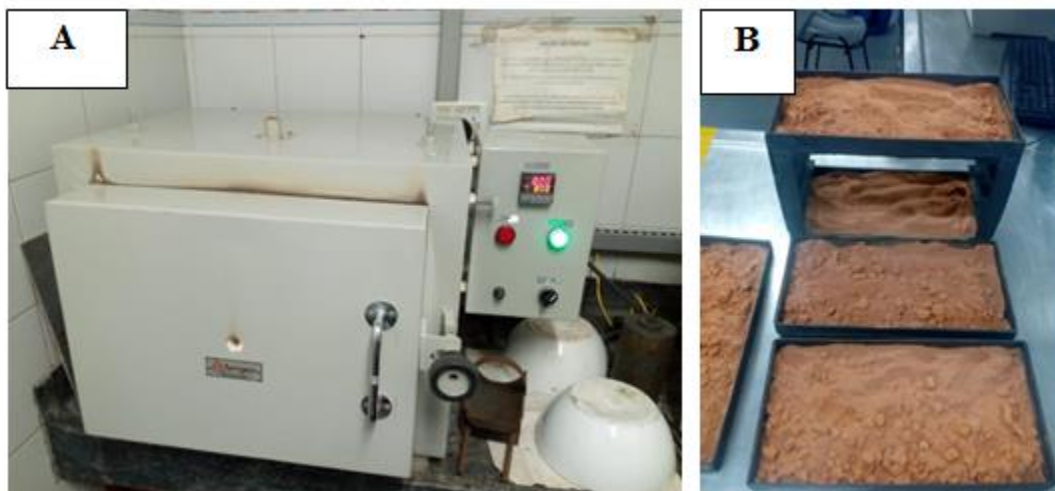


Figura 11. A: Horno Terrígeno Modelo MM20, B: Cenizas de lodo de PTAP. Nota. Fuente: Elaboración propia (Utria Marledys, Pacheco María)

4.2. Caracterización de los materiales

Para la fabricación de los especímenes se utilizó un agregado grueso proveniente de una cantera de Rotinet, Atlántico. El agregado fino fue obtenido de la Cantera Sello Rojo, ubicada en Puerto Colombia, Atlántico; el cemento a emplear fue de la marca Argos, tipo UG (NTC 121).

4.2.1. Caracterización de los agregados

Los ensayos de caracterización de agregados fueron realizados en LCV laboratorios, ubicado en la ciudad de Barranquilla. Para estos fueron necesarios 15 kg de muestra de cada agregado. Este valor se encuentra entre los rangos mínimos dados por la normativa de NTC 77.

Granulometría: Se aplicó la norma NTC 77. Esta norma describe el método para determinar los porcentajes de suelo que pasan por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo, hasta el de 75 μm (No.200). En la Figura 12 se observa la realización del ensayo de granulometría.



Figura 12. Ensayo de Granulometría. Nota. Fuente: Elaboración propia (Utria Marledys, Pacheco María)

- a) Densidad y absorción del agregado fino:** Se realizó bajo la norma NTC-237 para determinar valores de densidad aparente, densidad aparente saturada y superficialmente seca, densidad nominal y absorción.
- b) Humedad del agregado fino y grueso:** Se realizó bajo la norma NTC 1776
- c) Peso específico y absorción agregado grueso:** los ensayos fueron realizados de acuerdo con la norma NTC 176-237 (Figura 13); sus resultados permitieron la realización de la corrección de la cantidad de agua para la fabricación de las mezclas de concreto.



Figura 13. A: Peso de la muestra, B y C: Muestra pesada con el recipiente, D: Muestra pesada en inmersión, E: Muestra en absorción. Nota. Fuente: Elaboración propia (Utria Marledys, Pacheco María)

4.3. Diseño de mezcla de concreto

El diseño de mezcla se realizó por el método de volumen absoluto dado por el comité ACI 211; se basa en medir el volumen ocupado por los materiales (cemento, agua, grava y arena) en 1m^3 de concreto y se diseña tanto para una mezcla en estado fresco como endurecido. La metodología que rige los diseños de mezclas de concreto es la ACI 211.1 que a su vez, está basada en la norma ASTM C33, donde se hace referencia a las especificaciones granulométricas (Romero Quintero & Hernandez Rico, 2014).

Las mezclas de concreto se elaboraron en el Centro de Mezclas de la Universidad de la Costa, sede Barranquilla. Se realizaron tres tipos de mezclas de concreto tal como se describen a continuación:

- Probetas cilíndricas con 100% de cemento (P_0)
- Probetas con 95% de cemento + 5% de cenizas de lodo PTAP (P-5cl)
- Probetas con 90% de cemento + 10 % de cenizas de lodo PTAP (P-10cl)

4.3.1. Cálculo del diseño de mezclas de concreto

A partir de la caracterización de los materiales (ver Capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se obtuvieron los parámetros necesarios para realizar el diseño de mezcla por el método ACI, teniendo en cuenta que la resistencia teórica del concreto proyectada a los 28 días debe ser de 30 MPa.

4.3.1.1. Resistencia requerida

Debido a falta de datos estadísticos de ensayos de resistencia a compresión de los materiales utilizados para la fabricación del concreto, se calculó la resistencia requerida de diseño de mezcla utilizando la ecuación dada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para el rango de $21 \text{ MPa} \leq f_c \leq 35 \text{ MPa}$.

Tabla 2

Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra

Resistencia Especificada a la compresión, en Mpa	Resistencia promedio requerida a la compresión, en Mpa
$f_c < 21$	$f'_{cr} = f_c + 7.0$
$21 \leq f_c \leq 35$	$f'_{cr} = f_c + 8.3$
$f_c > 35$	$f'_{cr} = 1.10f_c + 5.0$

Nota: Fuente (Reglamento Colombiano de construcción Sismo Resistente, 2010)

Tabla 3

Resistencia teórica requerida para la mezcla de concreto portland a los 28 días

<i>Determinación resistencia requerida</i>
$f'_{cr} = f'_c + 8,3$
$f'_{cr} = 38,3 \text{ MPa}$

Nota: Fuente: (Elaboración propia Pacheco María, Utria Marledys)

4.3.1.2. Selección del asentamiento

La manejabilidad es una propiedad del concreto fresco que se refiere a la facilidad con que este puede ser mezclado, manejado, transportado, colocado, compactado y terminado sin que pierda su homogeneidad. El grado de manejabilidad depende del tamaño y la forma del elemento que se vaya a construir, de la disposición y tamaño de refuerzo y de los métodos de compactación y colocación (Rivera, 2008).

Con base en la Tabla 4 la consistencia y humedad de la mezcla de concreto, se buscó que el asentamiento se quedara entre los rangos de 75 mm a 150 mm (utilizados en estructuras convencionales de concreto). Para la fabricación de los moldes cilíndricos de concreto, se optó por un asentamiento de $120 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ para las mezclas, que permitió una mayor facilidad durante el vaciado y compactación.

Tabla 4

Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y compactación

Consistencia	Asentamiento (mm)	Tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de compactación
Muy seca	0-20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación.	Con vibradores de formaletas; concretos de proyección neumática (lanzados).	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	20-35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa
Semi-seca	35-50	Pavimentos, fundaciones en concreto simple. Losas poco reforzadas.	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas con vibración
Media	50-100	Pavimentos	Colocación	Secciones

(plástica)		compactados a mano, losas, muros, vigas, columnas, cimentaciones.	manual	simplemente reforzadas con vibración
Húmeda	100-150	Elementos estructurales esbeltos muy reforzados.	Bombeo	Secciones bastante reforzadas con vibración
Muy húmeda	150-200	Elementos esbeltos, pilotes fundidos in situ	Tubo embudo tremie	Secciones altamente reforzadas sin vibración
Súper fluida	Más de 200	Elementos muy esbeltos	Autonivelante, autocompactante	Secciones altamente reforzadas sin vibración y normalmente no adecuados para vibrarse

Nota: Fuente: Elaboración de (Rivera, 2008)

4.3.1.3. Contenido de aire

Por medio de la metodología del Comité ACI 211, para la mezcla el contenido de aire atrapado se estimó con un porcentaje del 1,5% para un volumen de un metro cúbico de concreto.

4.3.1.4. Cantidad de agua de mezclado

De acuerdo con el método ACI 211, considerando el asentamiento adoptado de 120 mm, un contenido estimado de aire en la mezcla de 1.5% y el tamaño máximo nominal del agregado grueso de 25mm, el agua de mezclado necesario dado por la Tabla 5 arrojó como resultado 205 L para un metro cúbico de concreto.

Tabla 5

Agua de mezclado

Asentamiento o <i>Slump</i>		Agua en L/m ³ de concreto para los tamaños máximos de agregados gruesos y consistencia indicados							
		10mm	12,5 mm	20	25	40	50	70	150
				mm	mm	mm	mm	mm	mm
		3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2	2"	3"	6"
CONCRETO SIN AIRE INCORPORADO									
3 a 50 (1" a 2")		205	200	185	180	160	155	145	125
80 a 100 (3" a 4")		225	215	200	195	175	170	160	140
150 a 180 (6" a 7")		240	230	210	205	185	180	170	-
Cantidad aproximada de aire atrapado (%)		3	2,5	2	1,5	1	0.5	0.3	0,2
CONCRETO CON AIRE INCORPORADO									
3 a 50 (1" a 2")		180	175	165	160	145	140	135	120
80 a 100 (3" a 4")		200	190	180	175	160	155	150	135
150 a 180 (6" a 7")		215	205	190	185	170	165	160	-
Contenido total de aire incorporado (%)	Exposición suave	4,5	4	3,5	3,5	3	2	1,5*	1,0*
	Exposición moderada	6	5,5	5.0	5	4,5	4	3,5	3
	Exposición severa	7,5	7	6	6	5,5	5	4,5*	4,0*

Nota:Elaboración de (Kosmatka, S., Kerkhoff, B., & Panarese, W. (2002)).

4.3.1.5.Relación Agua/Material Cementante(a/mc)

La elección de la relación agua/material cementante (a/mc) depende básicamente de la resistencia y la durabilidad. Se utilizan los valores de la Tabla 6 de donde se consigue para una resistencia de 38,3 MPa y para un concreto sin aditivo incorporador de aire, una relación a/mc de 0,437 (mediante interpolación demostrada en la tabla 7).

Tabla 6

Relación entre agua y material cementante resistencia a la compresión del concreto

Resistencia a la compresión a los 28 días MPa	Relación agua- materiales cementosos en masa	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
45	0,38	0,30
40	0,42	0,34
35	0,47	0,39
30	0,54	0,45
25	0,61	0,52
20	0,69	0,60
15	0,79	0,70

Nota: Fuente: Kosmatka, S., Kerkhoff, B., & Panarese, W. (2002).

Tabla 7

Datos interpolación Relación Agua/Cemento

Relación agua cemento	
Resistencia a la compresión a 28 días, Mpa	Aire incorporado
40	0,42
38,3	0,437
35	0,47
A/C	0,43

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

4.3.1.6. Contenido de Cemento

Con la relación agua/material cementante elegida y la cantidad de agua, se logra calcular la cantidad de cemento por metro cubico de concreto. Mediante la ecuación 1:

$$r = \frac{a}{mc} \quad (1)$$

Dónde:

$r = \text{relacion agua / material cementante}$

$a = \text{agua de mezclado}$

$mc = \text{contenido de material cementante}$

Reemplazando, se obtiene:

$$r = 0,43$$

$$a = 205 \text{ kg/m}^3$$

$$mc = \frac{205 \text{ kg/m}^3}{0,43} = 476,744186 \text{ Kg/m}^3$$

$$mc = 476,74 \text{ Kg/m}^3$$

4.3.1.7. Contenido de agregado grueso

Se debe conocer el volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto, mediante el tamaño máximo nominal (TMN) de este y el módulo de finura del agregado fino (MF). Este dato se obtiene de la tabla 8 dando como resultado el valor de 0,675 mediante interpolación entre los MF de 2,80 y 3,00 para un TMN de 25 mm. Luego, con las características de los agregados mostrada en la tabla 9, y utilizando la ecuación 2, se obtiene como resultado un contenido de agregado grueso de 1001,1 kg/m³.

Tabla 8

Volumen de agregado grueso (m³) por unidad de volumen de concreto

Tamaño Máximo del Agregado Grueso		Volumen de agregado grueso, seco y compactado (*) por unidad de volumen de concreto, para diferentes módulos de finura del agregado fino			
		Módulo de Fineza del Agregado Fino			
mm	Pulgadas	2,40	2,60	2,80	3,00
10	3/8"	0,50	0,48	0,46	0,44
12,5	1/2"	0,59	0,57	0,55	0,53
20	3/4"	0,66	0,64	0,63	0,60
25	1"	0,70	0,69	0,67	0,65
40	1 1/2"	0,76	0,74	0,72	0,70
50	2"	0,78	0,76	0,74	0,72
70	3"	0,81	0,79	0,77	0,75
150	6"	0,87	0,85	0,83	0,81

Nota: Fuente: Elaboración de (Kosmatka, S., Kerkhoff, B., & Panarese, W., 2002)

Tabla 9

Datos de los agregados

DATOS	
Tamaño máximo nominal A. grueso	25mm
Módulo de finura A. fino	2,75
Dato de la tabla	0,675
Densidad aparente	1483Kg/m ³

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

$$\begin{aligned} \text{Masa seca A. Grueso} \\ = \text{Densidad aparente} * \text{Vol de A. grueso por unidad de vol de concreto} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{Masa seca A. Grueso} = 1483 \text{ kg/m}^3 * 0,675$$

$$\text{Masa seca A. Grueso} = 1001,1 \text{ kg/m}^3$$

4.3.1.8. Contenido de agregado fino

Conforme a la metodología del volumen absoluto, el volumen de agregado fino es obtenido a partir de la sustracción entre el volumen total de la mezcla el cual es 1 y el volumen total de los materiales que componen la mezcla de concreto (agua, cemento, agregado grueso y vacíos), los datos mencionados anteriormente se muestran en la tabla 10, seguidamente con la ecuación (3) se determina la masa del agregado fino.

Tabla 10 Volúmenes materiales que componen la mezcla de concreto

Materiales	Volumen (m3)
Agua	0,205
Cemento	0,154
agregado grueso	0,398
Vacíos	0,015
Total volumen materiales	0,772
Volumen agregado fino	0,228

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

$$\begin{aligned} \text{Masa A. Fino} \\ = \text{Volumen A. Fino} \left(\text{Densidad Nominal A. Fino} \right. \\ \left. * \frac{1000 \text{ Kg}}{\text{m}^3} \right) \\ \text{Masa A. Fino} = 0,22 (2,63 * 1000 \text{ Kg/m}^3) \\ = 598,4 \text{ Kg} \end{aligned} \quad (3)$$

4.3.1.9. Cantidad de material para 1m³ de concreto

La tabla 11 muestra la cantidad de material en masa para un metro cúbico de mezcla a utilizar.

Tabla 11

Mezcla de concreto para un metro cúbico

Material	Cantidad de material para 1m ³ [kg]
Agua	205
Cemento	476,8
A. Grueso	1001,1
A. Fino	598,46

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

4.3.1.10. Reemplazo de cemento por cenizas de lodo de PTAP

Conociendo la cantidad exacta de cemento (476,8 Kg), se determina la cantidad de cenizas de lodo a utilizar partiendo de un remplazo de ceniza de lodo de 5% y 10% mediante el siguiente calculo:

- Remplazo del 5%:

$$Cantidad\ 5\% = 476,8 - (476,8 * 5\%) = 452,96kg/m^3$$

$$Cantidad\ de\ cemento\ 95\% = 452,96kg$$

$$Cantidad\ de\ cenizas\ 5\% = 23,84Kg$$

(4)

- Remplazo del 10%:

$$\text{Cantidad } 10\% = 476,8 - (476,8 * 10\%) = 429,12 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Cantidad de cemento } 90\% = 429,12 \text{ kg} \quad (5)$$

$$\text{Cantidad de cenizas } 10\% = 47,38 \text{ Kg}$$

La tabla 12 muestra el resumen de las cantidades de cemento y cenizas para 1m³ de concreto calculadas, así como también las cantidades para un concreto sin cenizas.

Tabla 12

Cantidad de cemento y cenizas para 1 m³ de concreto.

Porcentaje de reemplazo	Cemento (kg/m ³)	Cenizas (kg/m ³)	Total (kg/m ³)
0%	476,8	-	476,8
5%	452,96	23,84	476,8
10%	429,12	47,68	476,8

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

4.3.1.11. Corrección por humedad del diseño de mezcla en estado seco

Es sabido que el agregado grueso y fino por las condiciones ambientales que le rodean cambia su humedad natural, por esta razón se calcula su humedad de acuerdo con la norma NTC 1776, obteniendo como resultados la humedad para el agregado fino de 3,12% y agregado grueso de 4%. Los datos de humedad son divididos entre cien y se le suma uno, luego el dato obtenido es multiplicado por el contenido de agregados determinados antes de la corrección por humedad.

Así, se realizó la corrección del diseño de mezcla de concreto, obteniendo los nuevos pesos húmedos de los agregados (mostrados en la tabla 13) y de agua (tabla 14).

Tabla 13

Pesos de los agregados húmedos

Material	humedad (en enteros)	Peso del material seco (Kg)	peso del material húmedo (Kg)
Agregado grueso	1,04	1001,1	1041,144
Agregado fino	1,0312	598,46013	617,132086

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

Tabla 14

Corrección agua de mezclado por humedad

Agua de mezclado	191,38 Kg
------------------	-----------

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

La cantidad de material para 1 m³ de concreto con ajustes de humedad queda como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15

Mezcla de concreto para un metro cúbico con corrección de humedad

Material	Cantidad (Kg)
Agua	191,38
Cemento	476,8
A. Grueso	1041,14
A. Fino	617,13

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

4.4. Cantidad de especímenes

Se elaboraron 12 probetas cilíndricas de 20 cm × 10 cm para cada tipo de mezcla con un total de 36 probetas. Para que estas tuvieran igualdad de condiciones, se mantuvo la misma relación a/mc de 0,437 y un asentamiento de 120 mm.

El primer tipo de mezcla corresponde a la mezcla de control la cual se conforma únicamente de cemento (P_0), en segundo lugar, se tienen las probetas fabricadas con un 5% de reemplazo de cenizas de lodo (P-5cl) y finalmente el ultimo tipo de mezcla fabricado con un 10% de reemplazo de cenizas de lodo (P-10cl) como se muestra en la figura 14.



Figura 14. Mezcla con 10% de ceniza adicionada. Nota. Fuente: Elaboración propia (Utria Marledys, Pacheco María)

4.4.1. Fabricación de concreto fresco - Fase 1

Para el proceso de fabricación del concreto se inició pesando los materiales a utilizar para proceder a añadir estos a la mezcladora; en el anexo 1 se encuentran la cantidad de materiales utilizados para cada tipo de mezcla. En las mezclas con adición de cenizas de lodo se evidencia bastante viscosidad en el concreto fresco, así que el proceso de la mezcla con los agregados tuvo que ser rápida para garantizar uniformidad en el concreto.

La figura 15 muestra el proceso de vaciado de los cilindros, procedimiento que se realizó bajo la Norma I.N.V.E- 402-07. Con la mezcla lista se llenan los moldes cilíndricos respectivamente en tres capas, cada una compactada con 25 golpes realizados con una varilla de 5/8" de diámetro; finalmente se enrasó y se cubrió para evitar la evaporación. Para llevar a cabo este procedimiento se tuvo en cuenta que todos los moldes estuvieron localizados cerca de la mezcladora, para evitar contratiempos en el transporte de la mezcla, y además, los moldes cilíndricos fueron reposados, durante las primeras 24 horas, sobre una superficie horizontal, rígida y libre de vibración. Posteriormente se desencofraron los cilindros y se colocaron en el cuarto de curado en una tina llena con una solución de agua y cal, libre de contaminantes hasta el momento de fallarlos a compresión, la cual se hizo a los 3, 7 y 28 días después de su fabricación como se muestra en la Figura 16; una vez se fallaron los cilindros se determinó la resistencia del concreto, dividiendo la carga máxima de ruptura por su área de sección transversal.



Figura 15. Vaciado de cilindros. Nota. Fuente: Elaboración propia (Utria Marledys, Pacheco María)



Figura 16. Curado de especímenes en el Tanque. Nota. Fuente: Elaboración propia (Utria Marledys, Pacheco María)

4.5. Ensayo de resistencia a la compresión

Este ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a cilindros moldeados o a núcleos, a una velocidad de carga prescrita, hasta que se presente la falla. La resistencia a la compresión del espécimen se determina dividiendo la carga aplicada durante el ensayo por la sección transversal de éste (INVE 410-07, 2007). El primer paso para la realización de este ensayo fue tomar las medidas de los especímenes (diámetro y altura), utilizando un calibrador electrónico, seguido de esto se toma el peso de cada uno de los cilindros y se marcan para poder identificarlos y agrupar correctamente los datos obtenidos en la tabla de resultados.

Los especímenes son colocados uno a uno en la máquina de resistencia a la compresión modelo CT-1500, presente en el laboratorio de Resistencia de los Materiales de la Universidad de la Costa. Este procedimiento se debió realizar en el menor tiempo posible para evitar el secado de los cilindros antes de ensayarse.

Una vez finalizado el ensayo de compresión, se procedió a clasificar el tipo de falla para cada espécimen teniendo en cuenta la figura 17, que muestra cómo se clasifica los especímenes según el tipo de falla.

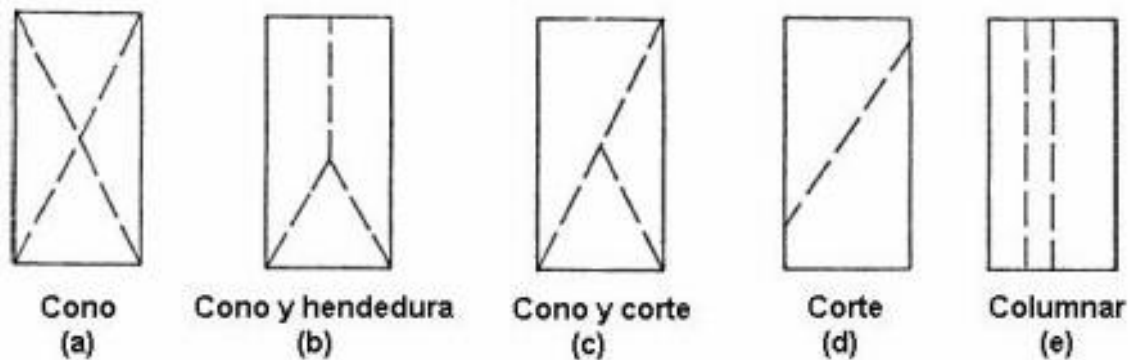


Figura 17. Esquema de los modelos de fractura típica. Adaptado de INVE 410-07. (2007). Resistencia a La Compresión De Cilindros De Concreto, 16.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar que los cilindros registraron distintos patrones de falla, razón de la cual no se logran clasificar en un solo grupo. La falla más típica fue la falla tipo c de cono y corte. En el anexo 3 se observan más figuras de especímenes sometidos al ensayo de compresión.





Figura 18. A: Falla de la mezcla de Concreto con 100 % de cemento, B: Falla de la mezcla de concreto con 5% de cenizas, C: Falla de la mezcla de concreto con 10% de cenizas Fuente: Elaboración Propia. (Utria Marledys, Pacheco María)

4.6. Ensayo de absorción en concreto endurecido

El ensayo de absorción fue realizado en el laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad de la Costa. Para este ensayo se utilizaron 3 probetas de concreto por cada tipo de mezclas, como indica la norma NTC 5653:2008.

Los especímenes fueron dejados sumergidos por 24 horas; seguidamente fueron sumergidos en una canastilla, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** A. De esta manera se obtuvo el dato de masa del espécimen inmersa en agua y suspendida. Posteriormente se retiró la probeta y secó superficialmente para ser pesada nuevamente y se obtuvo la masa saturada seca superficialmente. Finalmente, las probetas fueron

dejadas 24 horas a 105°C en el horno como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** B para obtener el valor de masa del espécimen secada al horno.



Figura 19. Ensayo de absorción, A: Inmersión de probetas, B: Secado al horno. Nota. Fuente: Elaboración propia (Utria Marledys, Pacheco María)

5. Resultados y discusión

5.1. Caracterización de los materiales

A continuación, se muestran los resultados de caracterización obtenidos para cada uno de los materiales utilizados en esta investigación. Realizado los ensayos de caracterización de los materiales se obtuvieron los siguientes resultados.

a. Ensayo de Granulometría

La curva granulométrica obtenida para el agregado fino se observa en la Figura 20. A partir de la clasificación del sistema unificado (SUCS) y bajo los resultados obtenidos (ver tabla 16 y figura 20) se puede establecer que el material es una arena bien gradada (SW), dado que el porcentaje que pasa el tamiz N°4 es mayor al 50%, su índice de uniformidad (Cu) es mayor a 6 y el índice de curvatura esta entre 1 y 3 (Ver tabla 17). El módulo de finura calculado para este

material fue de 2,75 (tabla 16). El valor que identifica a una arena es su módulo de finura que es el tamaño promedio de las partículas de arena. Este es el parámetro que valora la arena, y sus intervalos son los siguientes:

Los valores óptimos del módulo de finura para utilizar la arena en el concreto

Hidráulico, están entre (2.15% – 3.38%).

Arena > 2.5; arena gruesa.

Arena = 2.5; arena media.

Arena < 2.5; arena fina.

Por lo tanto, la arena a utilizar en las mezclas es una arena clasificada como gruesa.

Tabla 16

Granulometría Agregado fino.

Peso de la muestra: 626,8 gr		Módulo de finura = 2,75			
Tamiz	Peso Ret.	% Retenido	% Pasa	tamiz mm	NTC 174
3/8 "	0,00	0,00	100,00	9,51	100,0
No 4	2,35	0,37	99,63	4,75	95-100
No 8	72,00	11,49	88,14	2,38	80-100
No16	111,78	17,83	70,30	1,19	50-85
No 30	174,00	27,76	42,54	0,595	25-60
No 50	156,40	24,95	17,59	0,297	10-30
No 100	68,18	10,88	6,72	0,149	2-10
No 200	22,63	3,61	3,10	0,075	0-0
Fondo	14,93	2,38	0,72		
Suma	607,34				
Tamiz					

Nota: Fuente: Elaboración Propia con base a (Invias, Invias -123,2012)

Tabla 17

Criterios SUCS para las arenas

SUCS Arena bien gradada (SW)	A. Fino
$C_u > 6$	$C_u = 6,55$
$1 \leq C_c \leq 3$	$C_c = 1,49$

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

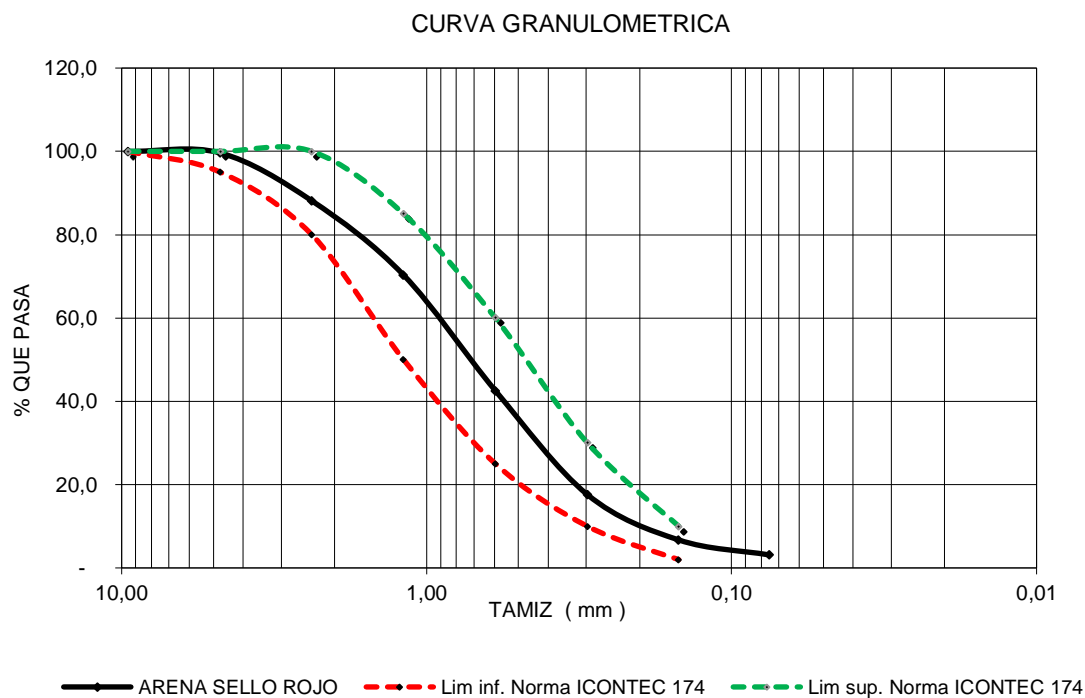


Figura 20. Curva granulométrica Agregado fino. Fuente: Propia con base a NTC 174: Concretos: especificaciones de los agregados para concreto (2000). Colombia.

En el caso del agregado grueso, los resultados obtenidos indican que el material es una grava mal gradada (GP) ya que el C_u no es mayor a 4 ni el C_c esta entre 1 y 3 esta es una mezcla de grava, arena, con poco o ningún fino (ver la tabla 19), además que cumplen con el tamaño

nominal de las partículas. Los resultados del análisis granulométrico se observan en la tabla 18 y la curva granulométrica se muestra en la figura 21.

Tabla 18

Resultados del ensayo de granulometría Agregado grueso.

Tamiz	Peso Ret.	% Retenido	% Pasa	tamiz mm	NTC 174
3"	0,0	0,00	100,00	76,1	
2"	0,0	0,00	100,00	50,8	
1 1/2"	0,0	0,00	100,00	38,1	
1"	0,0	0,00	100,00	25,4	100
3/4"	63,8	8,99	91,01	19,0	90-100
1/2"	396,0	55,77	35,24	12,7	20-55
3/8"	150,0	21,13	14,11	9,51	0-15
No 4	80,0	11,27	2,85	4,76	0-5
No 10	20,2	2,85	0,00	2	
No40	0,0	0,00	0,00	0,420	
No 200	0,0	0,00	0,00	0,075	
Fondo	0,0	0,00	0,00		
Suma Tamiz	710,0				

Nota: Fuente: Elaboración Propia con base a NTC 174: Concretos: especificaciones de los agregados para concreto (2000).

Tabla 19

Criterios SUCS para Grava bien gradada

SUCS grava bien gradada (GW)	A. Grueso
$C_u > 4$	$C_u = 1,913$
$1 \leq C_c \leq 3$	$C_c = 281,83$

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

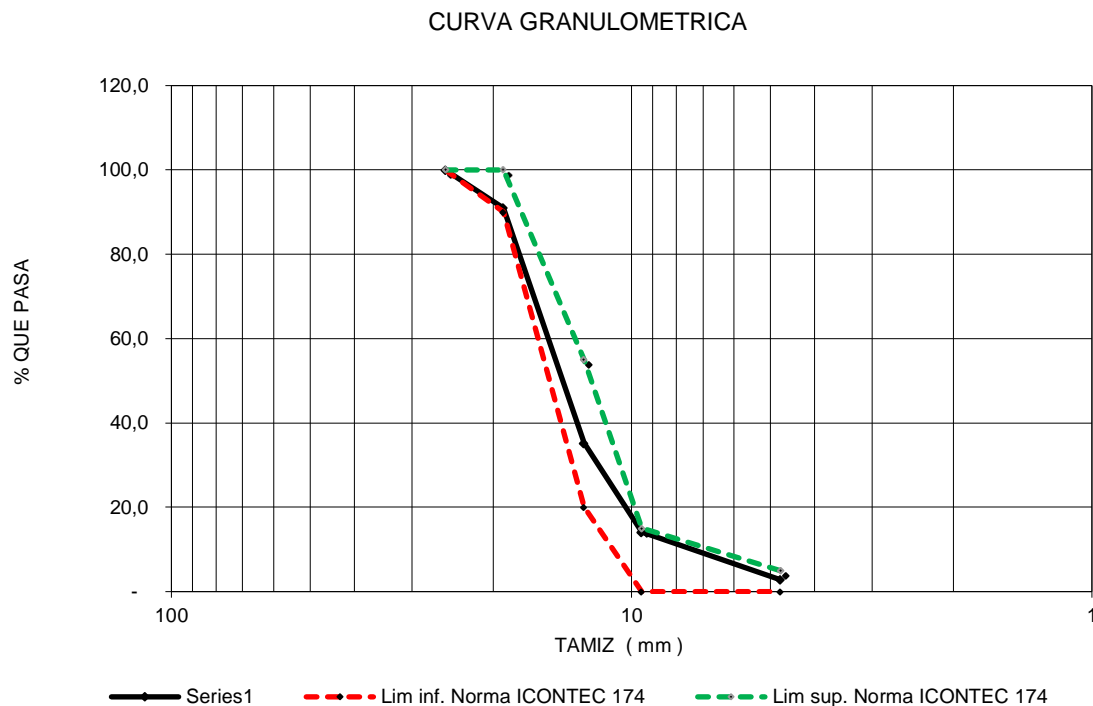


Figura 21. Curva granulométrica agregado grueso. Fuente: Propia con base a NTC 174: Concretos: especificaciones de los agregados para concreto (2000).

b. Densidad y absorción del agregado fino:

Los resultados de densidad y absorción del agregado fino se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. 20.**

Para obtener una mezcla de concreto que cumpla la resistencia esperada, es importante determinar que la densidad y la absorción (%A) de agregados finos y gruesos cumplan con los intervalos estipulados en las normas NTC 237 y 176 respectivamente. El peso específico es uno

de los parámetros de mayor importancia en el diseño de la mezcla de concreto hidráulico, porque en función de este se determina la cantidad en peso del agregado, y del cual depende la cantidad de poros que se obtengan en la mezcla (Amaris & Rondo, 2009) . Por otro lado, la absorción resulta también importante ya que, si se tiene un porcentaje elevado o fuera del intervalo permitido por la norma, el material resulta siendo muy poroso, afectando directamente la dosificación de agua, haciendo que disminuya la resistencia del concreto. El agregado fino presentó una densidad de $2,63 \text{ g/cm}^3$ y un porcentaje de absorción de 5,21%, lo cual, de acuerdo

Densidad y absorción del agregado fino NTC 237		con la norma, es adecuado por
Densidad aparente	2312,35 Kg/m ³	encontrarse la densidad entre
Densidad aparente base saturada y superficialmente seca	2,43 Gr/cm ³	2.40 - 2.50 g/cm ³ y la absorción
		entre 2.0 - 8.0 %.
Densidad relativa	2,63	
Absorción	5,21%	Tabla 20

Densidad y absorción del agregado fino NTC 237

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

c. *Peso específico y absorción agregado grueso:*

Los resultados de peso específico y absorción del agregado grueso se muestran en la tabla 21. El agregado grueso presentó un peso específico de $2,50 \text{ g/cm}^3$ y un porcentaje de absorción de 1,4, los cuales, de acuerdo a la norma, son aptos para la elaboración concreto hidráulico por

encontrarse entre 2.40 - 2.50 g/cm³ y 4.0 - 12.0%, para el peso específico y la absorción respectivamente.

Tabla 21

Peso específico y absorción del agregado grueso.

Peso específico y absorción norma NTC 176		
Datos de laboratorio		
Peso muestra seca grs. (A)	2904,8	
Peso de la muestra saturada superficialmente seca grs. (B)	2945,2	
Peso de la muestra en el aire grs. (A)	2904,8	
Peso de la muestra saturada superficialmente seca grs. (B)	2945,2	
Peso en el agua, muestra saturada grs. (C)	1748	
Peso de la canastilla grs.	1540	
Resultados		
% De absorción	1,39	%
Peso específico aparente seco (peasec)	2,42	g/cm ³
Peso específico aparentemente saturado (peasat)	2,46	g/cm ³
Peso específico nominal	2,50	g/cm ³

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

d. Humedad del agregado fino y grueso:

La tabla 22 muestra la humedad del agregado fino y grueso. Cuando la humedad natural es cercana a 0%, se dice que el agregado está aportando agua a la mezcla de concreto hidráulico en mínimas cantidades, pero si la humedad del agregado está cercana a 100% o superior al 50%, se dice que el agregado está aportando mayor cantidad de agua a la mezcla de la requerida para el diseño (Amaris & Rondo, 2009); es importante saber esta propiedad. El ensayo de humedad realizado indicó para agregados finos una humedad de 3,12 % y para agregados gruesos un 4%, la humedad total de los agregados pétreos es relativamente baja, esto quiere decir que los poros del agregado están parcialmente secos y aporta una mínima cantidad de agua a la mezcla según la Norma NTC 1776.

Tabla 22

Humedad agregado fino y grueso NTC 1776

Humedad de los agregado NTC 1776	
W = contenido de humedad de la muestra en porcentaje A. fino	3,12%
W = contenido de humedad de la muestra en porcentaje A. Grueso	4%

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

5.2. Evaluación de la resistencia a la compresión vs. contenido de ceniza de lodo.

En este apartado presentamos los resultados de la resistencia obtenidos para los cilindros de la mezcla de control y las mezclas con diferentes adiciones de cenizas de lodo (5 y 10%). En la tabla 23, se muestran el esfuerzo promedio de los cilindros a las edades de 3, 7 y 28 días para cada porcentaje de remplazo de ceniza y el control. Debido a inconvenientes con los horarios de

laboratorio de la Universidad de la Costa el valor de la resistencia obtenida a los 3 días en los especímenes de concreto con adición de 10% de cenizas de lodo tuvo que ser estimado, teniendo en cuenta que a esta edad la resistencia es igual al 40% de la resistencia obtenida a los 28 días (García Meseguer, 2001). En el anexo 2 se pueden encontrar todos los datos del ensayo de resistencia a la compresión para todos los tipos de muestra.

Tabla 23

Promedios de Resistencia en Cilindros de concreto con diferentes adiciones de cenizas de lodo provenientes de PTAP

Promedios de Resistencia			
(días)	Mezcla Control (Mpa)	Mezclas 5% de cenizas (Mpa)	Mezclas 10% de cenizas (Mpa)
3	18,92	11,77	12
7	23,83	16,85	17,41
28	30,93	22,39	23,82

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utría Marledys)

De acuerdo con el gráfico de la Figura 22, se observa que los cilindros de control (mezcla promedio) tienen un comportamiento por encima de la media durante los primeros 14 días, Por lo contrario, se observa que aunque el promedio de resistencia de cilindros con 5% y 10% de remplazo fue el valor inferior a los 3 días de curado, este presenta un aumento considerable en las edades próximas, pero aun así los concretos modificados no igualan ni superan la resistencia requerida la cual era de 30MPa.

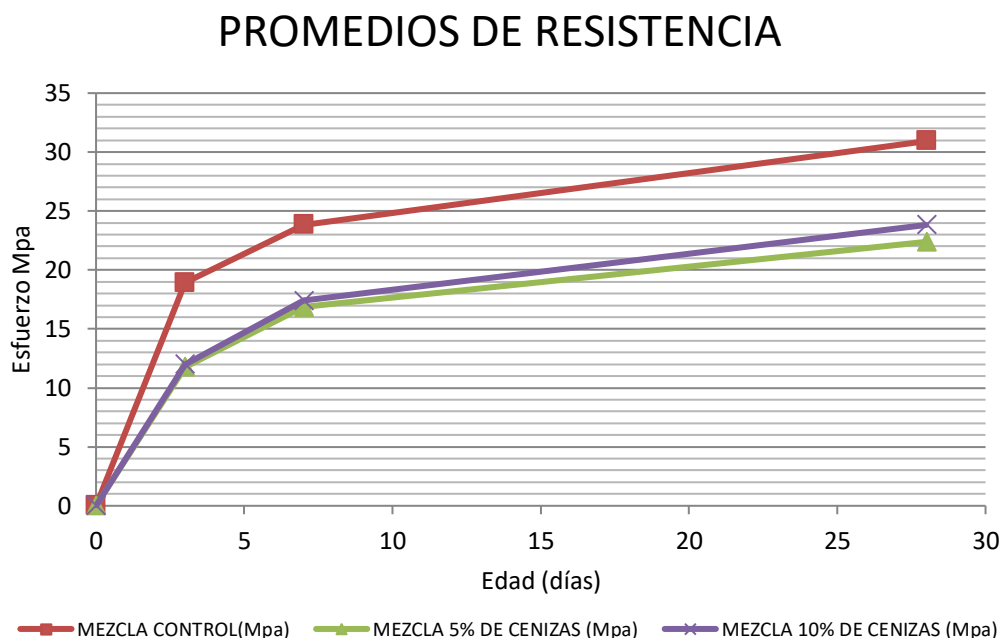


Figura 22. Promedio de las resistencias Nota. Fuente: Elaboración propia (Utria Marledys, Pacheco María)

En la Figura 23 se expresan los porcentajes de resistencia obtenidos por cada tipo de mezcla, comparados con los resultados dados en la mezcla de control. Analizando estos resultados se observa una reducción de hasta el 30% en la resistencia final. Para dar una posible explicación a este comportamiento se tuvo en cuenta los factores que influyen en la resistencia a la compresión del concreto los cuales son la composición química del cemento, la misma finura, la relación agua/material cementoso (bajas relaciones reducen el agua libre, reduciendo los vacíos y aumenta la resistencia), la calidad intrínseca de los agregados, las condiciones de temperatura ambiente y la eficiencia de curado. Teniendo en cuenta que en las mezclas se mantuvo la misma relación agua/material cementoso, se utilizaron los mismos agregados y la mezcla se realizó bajo las mismas condiciones de temperatura. El factor que pudo haber afectado hace referencia al reemplazo de cemento por un porcentaje de cenizas de lodo. Estudios químicos, realizados por medio de ensayos de fluorescencia de rayos x (FRX) de las cenizas de

lodos, se encontró que entre los óxidos presentes en las cenizas de lodo en comparación con el cemento Portland muestran un porcentaje menor de Oxido de Calcio (CaO) y porcentajes muy elevados de óxido de aluminio (Al_2O_3) los cuales superan los estándares dados por la norma NTC 321 “Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Químicas”. Estos óxidos son los componentes principales del cemento, responsables del proceso de hidratación, fraguado y endurecimiento en las mezclas de concreto de cemento portland. (Pereira, Velasquez, Valencia, Ramírez, & Muñoz, 2017). Por lo tanto, al modificar la mezcla de concreto con un porcentaje de cenizas de lodo, es probable que existiese una modificación en las reacciones que usualmente resultan utilizando cemento portland, afectando negativamente las propiedades de la mezcla. Para corroborar esta hipótesis es necesario realizar ensayos de actividad puzolánica y, a través del microscopio electrónico de barrido (SEM), comparar el tamaño de la partícula de ceniza de lodo con los compuestos generados por la hidratación del cemento y verificar si hay efectivamente alguna reacción entre la ceniza y estos compuestos.

Por otra parte, otro factor que pudo afectar la pérdida de resistencia en las mezclas con reemplazo de cenizas, son las propiedades de la pasta que dependen en buena parte de la naturaleza y de la evolución de la adherencia de los productos formados en la interfase esfera/matriz de la pasta, por lo cual depende de las características del clinker y de la ceniza, así como de la finura y proporciones de ambos, y del tiempo. En efecto, a cortas edades esta interfase presenta una mayor proporción de superficie inconsolidada, tanto mayor cuanto mayor es la proporción de ceniza. Esta es la razón por la cual la disminución de resistencia causada por las cenizas es tanto mayor cuanto mayor es su proporción y más corta es la edad (Marroquin Moscoso, 2018).

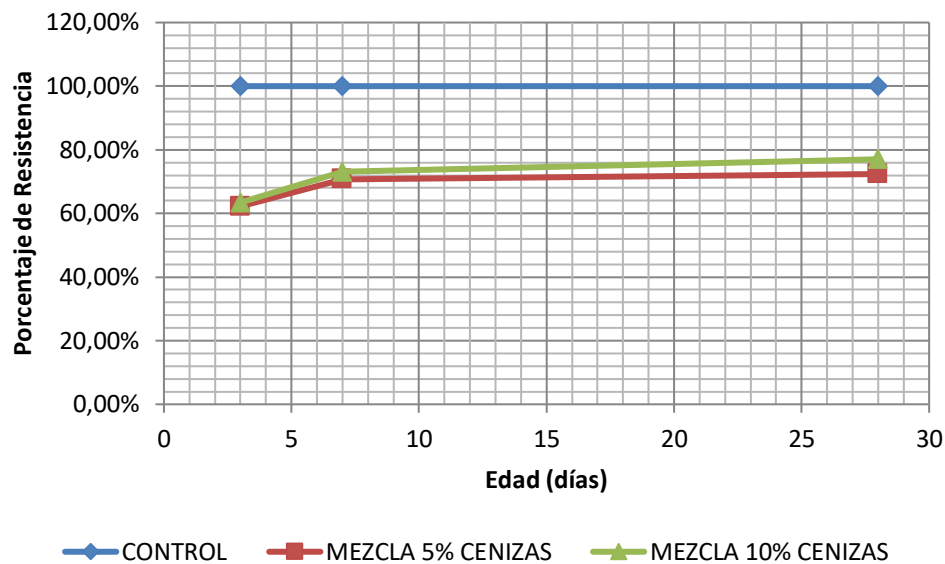


Figura 23. Porcentajes de resistencia (Utria Marledys, Pacheco Maria).

5.3. Absorción

Siguiendo los procedimientos establecidos por la NTC 5653:2008, se agruparon, según el tipo de muestra, los datos obtenidos de los especímenes ensayados (ver anexo), para seguidamente realizar el cálculo de la absorción de los cilindros con las siguientes ecuaciones y finalizar con el cálculo de la absorción los cuales se presentan en la tabla 24.

$$Absorción (Aa), \frac{g}{mm^3} = \left[\frac{(M_h - M_s)}{(M_h - M_a)} \right] * 1000 \quad (6)$$

$$Absorción (Aa), \frac{Kg}{m^3} = \left[\frac{(M_h - M_s)}{(M_h - M_a)} \right] * 1000 \quad (7)$$

$$Absorción (Aa\%), \frac{g}{mm^3} = \left[\frac{(M_h - M_s)}{(M_s)} \right] * 100 \quad (8)$$

Dónde:

Mh= Masa saturada del espécimen, en kg o g

Ma= Masa del espécimen inmerso en agua suspendida, en Kg o g

Ms=Masa seca del espécimen en kg o g

Tabla 24

Cálculo de Absorción de Concreto

Cálculos de absorción				
		Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
Cilindros de control	Absorción (Aa), g/mm ³	92,76	92,99	89,25
	Absorción (Aa), Kg/m ³	92,76	92,99	89,25
	Absorción (Aa%), %	5,02	4,99	4,72
Cilindros con cenizas 5%	Absorción (Aa), g/mm ³	93,78	101,03	107,93
	Absorción (Aa), Kg/m ³	93,78	101,03	107,93
	Absorción (Aa%), %	4,94	5,36	5,70
Cilindros con cenizas 10%	Absorción (Aa), g/mm ³	98,61	101,55	100,56
	Absorción (Aa), Kg/m ³	98,61	101,55	100,56
	Absorción (Aa%), %	5,24	5,33	5,28

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

Analizando los resultados obtenidos por medio del ensayo de absorción se puede notar que los especímenes elaborados con un porcentaje de cenizas de lodo tienen una mayor absorción en comparación con los cilindros de control. Una posible explicación a este comportamiento puede ser el hecho de que al momento de la compactación de las probetas fabricadas con cenizas de lodo estas demostraron una reducción considerable en su trabajabilidad mostrando una consistencia no tan fluida en comparación con los cilindros fabricados sin reemplazo por cenizas de lodo. Según ensayos de durabilidad del concreto (ISAT), realizados a una mezcla de concreto de cemento Portland con adición de cenizas, se muestra un

comportamiento que está sujeto al porcentaje de reemplazo de cenizas, es decir, entre mayor sea el porcentaje de cenizas que se adicione la muestra es más permeable, y están directamente relacionados con la menor resistencia mecánica de este tipo de concretos. (Valderrama, Torres Agredo, & Mejia de Gutierrez, 2011). Esto podría llegar a ser una explicación sobre el aumento de la absorción en las mezclas con adición de ceniza, ya que, en el concreto la absorción es medida por el volumen de espacio de poros que se encuentre a diferencia con la facilidad con la cual un fluido puede penetrarlo (permeabilidad), A mayor porosidad mayor será el porcentaje de absorción que se obtenga.

El secado de la muestra de lodo podría ser otra posible razón para esta variación en los valores de absorción ya que, en un extremo, el secado a temperatura ordinaria puede ser ineficaz para remover toda el agua; por el otro lado, el secado a altas temperaturas puede remover algo del agua combinada. Por lo tanto, la absorción no se puede utilizar como una medida de la cantidad del concreto, pero casi todos los concretos buenos tienen una absorción debajo del 10% por masa.

6. Conclusiones

Los ensayos de laboratorio realizados a los materiales que componen el concreto Hidráulico, como son los agregados pétreos y el cemento, permitieron clasificar y determinar las propiedades físicas de estos, indicando que son materiales óptimos para la elaboración de concretos, ya que los resultados obtenidos cumplen con los rangos requeridos por las Normas Técnicas Colombianas. Mediante los estudios previos de caracterización en agregados, se pudo ajustar un diseño de mezcla ideal que permitiera que la mezcla de control alcanzara el valor teórico de resistencia a la compresión a los 28 días, el cual era de 30 MPa. Pero al reemplazar hasta el 10% de porcentaje de cemento por las cenizas de lodo provenientes de PTAP se observó una disminución del 22% en la resistencia a la compresión.

Al realizar dos tipos de mezclas, con diferentes adicciones de cenizas de lodo provenientes de PTAP se pudo observar una disminución en la trabajabilidad de esta, en comparación con la mezcla de control. Seguidamente por medio de la evaluación de su comportamiento mecánico implementando los ensayos de laboratorio, se logró analizar que adicionar cenizas de lodo provenientes de PTAP no afecta negativamente a las mezclas de concreto de cemento Portland, ya que, pese que disminuye el valor de resistencia a la compresión, el concreto producido puede ser de gran utilidad en el sector constructivo debido a que se clasifica dentro de un concreto de tipo moderado.

El determinar un valor óptimo de reemplazo de cenizas de lodo provenientes de PTAP puede llegar a ser una nueva forma de construcción ecológica, ya que, al convertirse en un innovador mecanismo de gestión, manejo y disposición de lodos, se fortalece un desarrollo sostenible, con un importante aporte en la disminución de explotación y búsqueda de áridos en

canteras. Esto permite una mejora en la huella medioambiental, a través del uso de materias primas alternativas que minimizan el impacto y la producción de los principales gases que disminuyen la calidad del aire (CO , NO_2 , SO_2), y que producen el efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO_2)

Referencias

- Aldana Tique, A. J. (2017). Propuesta para el tratamiento y aprovechamiento de lodos en una PTAP convencional. Caso de estudio: Planta de tratamiento de agua potable de el Espinal-Tolima. *Universidad de La Salle, I*(Facultad de Ingenieria ambiental y sanitaria.), 106. Retrieved from http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/22405/41112712_2017.pdf?sequence=1
- Amaris, N. A., & Rondo, V. (2009). *USO DEL SILICATO DE SODIO COMO ADICIÓN NATURAL DEL CONCRETO HIDRAULICO*. Universidad de La Salle.
- Bermeo Barreto, A. M., & Idrovo Heredia, E. P. (2014). *APROVECHAMIENTO DE LODOS DESHIDRATADOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL COMO AGREGADO PARA MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.* ”.
- Castilla, J. D. (2018, December 28). Este año hubo un incremento en la producción de cemento gris de 6,3%. *La Republica*. Retrieved from <https://www.larepublica.co/economia/este-ano-hubo-un-incremento-en-la-produccion-de-cemento-gris-de-63-2810131>
- Centro de estudios y experimentación de obras públicas. (2011a). Blast Furnace Slag. Retrieved from <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/29/humo-de-silice/>
- Centro de estudios y experimentación de obras públicas. (2011b). Cenizas Volantes. Retrieved from <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/24/diciembre-2011/>

Centro de estudios y experimentación de obras públicas. (2012). Humo de Silice. Retrieved from <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/29/humo-de-silice/>

Daza Marquez, N., & Medina Sanchez, A. (2018). *Analisis comparativo del contenido de oxidos*. I. Universidad de la Costa. Retrieved from <http://hdl.handle.net/11323/301>

de Oliveira Andrade, J. J., Wenzel, M. C., da Rocha, G. H., & da Silva, S. R. (2018).

Performance of rendering mortars containing sludge from water treatment plants as fine recycled aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 192, 159–168.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.246>

Demanda, L. A., Carlos, J., & Alcaraz, D. (2008). La industria del cemento en colombia, 1–53.

Fernández, A. G. R. (2003). “*manejo de lodos producidos en la planta de tratamiento de agua potable, planta ii, del municipio de cartago, valle.*” Universidad Nacional de Colombia.

Garcia Meseguer, A. (2001). *Hormigon armado*. (Fundación escuela de la edificación Maestro Victoria, Ed.) (3rd ed.). Madrid: Toran S.A.

Geyer, A. L. B. (2001). Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto, 216.

Gutiérrez-Rosero, J. A., Ramírez-Fajardo, Á. I., Rivas, R., Linares, B., & Paredes, D. (2014). Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(25), 13–27.

INVE 410-07. (2007). Resistencia a La Compresion De Cilindros De Concreto, 16.

- Li, Z., Jiang, N., Wu, F., & Zhou, Z. (2013a). Experimental investigation of phosphorus adsorption capacity of the waterworks sludges from five cities in China. *Ecological Engineering*, 53, 165–172. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2012.12.038>
- Li, Z., Jiang, N., Wu, F., & Zhou, Z. (2013b). Experimental investigation of phosphorus adsorption capacity of the waterworks sludges from five cities in China. *Ecological Engineering*, 53(April 2013), 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.038>
- Marroquin Moscoso, K. J. (2018). *EVALUACIÓN DEL EFECTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO TIPO USO GENERAL, POR LA ADICIÓN DE PUZOLANA, FLY ASH Y CALIZA, A DIFERENTE TAMAÑO DE PARTÍCULA*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Monteiro, P. J. M., & Mehta, P. K. (2004). *Concreto*. (Instituto Mexicano de Cemento y Concreto, Ed.). Mexico. Retrieved from http://imcyc.com/redcyc/imcyc/biblioteca_digital/CONCRETO_ESTRUCTURA_PROPIEDADES_Y_MATERIALES.pdf
- Naisma Hernández, Mayda Ulloa, Yuri Almaguer, Y. R. (2014). EVALUACIÓN AMBIENTAL ASOCIADA A LA EXPLOTACIÓN DEL YACIMIENTO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN LA INAGUA, GUANTÁNAMO, CUBA, (38), 146–158.
- Norma Técnica Colombiana 121. Especificación de desempeño para el cemento hidraulico (2014). Colombia.
- O’Kelly, B. C. (2010). Landfill Disposal of Alum Water Treatment Residues: Some Pertinent Geoengineering Properties. *Journal of Residuals Science & Technology*;7 (2): 95-113 Apr

2010, 7(2), 95–113. Retrieved from <http://www.thomsoninnovation.com/tip-innovation/%5Cnhttp://www.thomsoninnovation.com/tip-innovation/recordView.do?datasource=WOK&category=LIT&selRecord=1&totalRecords=1&databaseIds=WOS,CCC&idType=uid/recordid&recordKeys=000276957000004/WOS:000276957000004>

Pacheco Jimenez, D., & Varela Gomez, K. V. (2019). *ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPARATIVO DEL CONTENIDO DE ÓXIDOS PRESENTES EN LODOS SIN CALCINAR, LODOS CALCINADOS Y CEMENTO PORTLAND*. Universidad de la costa.

Pereira, Y. A., Velasquez, S. R., Valencia, J. J., Ramírez, M. C., & Muñoz, A. P. (2017). Análisis comparativo de la concentración de óxidos presentes en el cemento portland y lodos de plantas de tratamiento de agua potable. *Afinidad*, 74(577), 68–73. Retrieved from <http://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/320832/411315>

Reglamento Colombiano de construcción Sismo Resistente. TITULO C: Concreto estructural (2010). Colombia.

Rivera, G. (2008). Manejabilidad del concreto. In *Manejabilidad del concreto* (pp. 83–103).

Romero Quintero, A. F., & Hernandez Rico, A. camilo. (2014). *DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGÓN POR EL MÉTODO A.C.I. Y EFECTOS DE LA ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES DE TERMOTASAJERO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN*. Universidad de Santo Tomas.

Sales, A., & de Souza, F. R. (2009). Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2362–

2370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.11.001>

Sales, A., De Souza, F. R., & Almeida, F. D. C. R. (2011). Mechanical properties of concrete produced with a composite of water treatment sludge and sawdust. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2793–2798. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.057>

Sales, A., De Souza, F. R., Dos Santos, W. N., Zimer, A. M., & Almeida, F. D. C. R. (2010). Lightweight composite concrete produced with water treatment sludge and sawdust: Thermal properties and potential application. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2446–2453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.012>

Sterba, F. (2018). El ordenador de procesos en la industria del cemento, 20.

Tafarel, N. F., Macioski, G., De Carvalho, K. Q., Nagalli, A., De Freitas, D. C., & Passig, F. H. (2016). Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água. *Revista Materia*, 21(4), 974–986. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160004.0090>

Técnica, N., Volantes, C., & Naturales, Y. P. (2017). NTC, (571).

Torres, P., Hernández, D., & Paredes, D. (2012). Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. *Revista Ingenieria de Construccion*, 27(3), 145–154. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732012000300003>

TRIPLE A. (2017). Etapas de la potabilización del Agua 1.

Unicef. (2006). *El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo. La infancia, el agua y el saneamiento básico en los planes de desarrollo departamentales y*

municipales. Retrieved from <http://www.unicef.org.co/pdf/Agua3.pdf>

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. (2017). Materiales cementantes

suplementarios. Retrieved from

http://www.uptc.edu.co/docentes/oscar_gutierrez/En_Concreto/Materia5

Valderama, C. P., Torres Agredo, J., & Mejía de Gutiérrez, R. (2011). *Características de*

desempeño de un concreto adicionado con cenizas volantes de alto nivel de quemados.

Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingenieria/rt/printFriendly/20519/33850?fbclid=IwAR1VN-hRwC6JEuzqhvdyaRxBS56zRLpxNG6ZP6HdR7XWMWOHDyOe-JIJA>

Zhao, Y. Q. (2003). Correlations between floc physical properties and optimum polymer dosage in alum sludge conditioning and dewatering. *Chemical Engineering Journal*, 92(1–3), 227–235. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00253-X](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00253-X)

Anexo 1 Cantidad de material

Tabla 25

Cantidad de materiales utilizados para la fabricación de las mezclas

Muestras	N° de cilindros	Cemento [kg]	Lodo [kg]	Arena [kg]	Grava [kg]	Agua [kg]
Control	12	8,99	-	11,63	19,63	3,61
5% lodo calcinado	12	8,54	0,45	11,63	19,63	3,61
10% lodo calcinado	12	8,09	0,9	11,63	19,63	3,61
Total	36	25,62	1,35	34,89	58,89	10,83

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

Anexo 2 Datos ensayo de compresión

Tabla 26

Datos Cilindros mezcla de control

Resistencia a la compresión de cilindros de concreto Norma NTC 673 - norma I.N.V. E 410									
Cilindro concreto + 0% cenizas de lodo. Resistencia: 4000psi									
	3 DIAS			7 DIAS			28 DIAS		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Altura (cm)	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5
Diámetro (cm)	9,91	9,95	9,91	9,91	9,81	9,76	9,74	9,68	9,71
Área (cm ²)	77,10	77,82	77,15	77,10	75,65	74,78	74,509	73,594	74,051
Peso (g)	3638	3616	3613	3599	3478	3609	3652	3661	3657
Tipo de falla	3	3	3	3	3	3	5	5	5
Carga (kn)	146,23	149,32	150,45	183,90	193,88	183,56	226,31	230,94	226,78
Carga (kgf)	14911,0	15226,1	15341,3	18752,2	19769,9	18717,6	23076,8	23548,9	23124,7
	7	6	9	8	4	1	3	5	6
Esfuerzo (Kgf/cm ²)	193,40	195,66	198,86	243,22	261,35	250,29	309,72	319,99	312,28
Esfuerzo (PSI)	2697,70	2757,16	2778,92	3396,78	3580,98	3389,53	4188,40	4274,17	4197,12
Esfuerzo (Mpa)	18,6	19,01	19,16	23,42	24,69	23,37	28,81	29,4	28,87
Desviación estándar	0,289885035			0,748086448			0,324704994		

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

Tabla 27

Datos cilindros con 5% de cenizas de lodo de PTAP

Cilindro concreto + 5% cenizas de lodo. Resistencia: 4000psi									
	3 DIAS			7 DIAS			28 DIAS		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Altura (cm)	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5
Diámetro (cm)	9,776	9,579	9,81	9,83	9,99	9,59	9,74	9,73	9,74
Área (cm ²)	75,06	72,07	75,60	75,86	78,45	72,28	74,509	74,356	74,509
Peso (g)	3598	3618	3543	3614	3616	3532	3526	3580	3587
Tipo de falla	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Carga (kn)	92,93	96,56	86,93	124,3	144,51	128,18	190,91	155,14	180,09
Carga (kgf)	9476,07	9846,2	8864,2	12674,8	14735,6	13070,5	19467,0	15819,6	18363,78
Esfuerzo (kgf/cm ²)	126,25	136,63	117,25	167,08	187,85	180,84	261,27	212,76	246,46
Esfuerzo (psi)	1511,29	1943,5	1699,8	2297,39	2668,69	2367,01	3522,56	3369,91	2871,26
Esfuerzo (mpa)	10,42	13,4	11,5	15,84	18,4	16,32	24,23	23,18	19,75
Desviación estándar	1,508685962			1,360784088			2,342996657		

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

Tabla 28

Datos cilindros con 10% de cenizas de lodo de PTAP

Cilindro concreto + 10% cenizas de lodo. Resistencia: 4000psi									
	5 DIAS			7 DIAS			28 DIAS		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Altura (cm)	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5
Diámetro (cm)	9,967	9,899	9,863	9,797	9,927	9,906	9,6	9,71	9,72
Área (cm ²)	78,02	76,96	76,40	75,38	77,40	77,07	72,382	74,051	74,203
Peso (g)	3541	3537	3559	3538	3536	3533	3538	3533	3530
Tipo de falla	3	3	3	3	3	3	3	3	3
carga (kn)	119,66	125,65	133,72	136,97	131,15	142,02	192,12	173,27	182,07
Carga (kgf)	12201,73	12812,53	13635,43	13966,83	13373,37	14481,78	19590,48	17668,34	18565,68
Esfuerzo (kgf/cm ²)	156,39	166,48	178,47	185,28	172,79	187,90	270,65	238,60	250,20
Esfuerzo (psi)	2211,82	2320,69	2469,95	2529,45	2422,13	2622,28	3767,77	3398,08	3570,60
Esfuerzo (MPa)	15,25	16	17,03	17,44	16,7	18,08	24,46	22,06	23,18
Desviación estándar	0,893662875			0,690603601			1,20088856		

Nota: Fuente: (Elaboración Propia Pacheco María, Utria Marledys)

Anexo 3 Figuras del ensayo de compresión

Figura 24. Ensayo de resistencia a la compresión cilindros de control a los 28 días. Nota. Fuente: Elaboración propia (Utria Marledys, Pacheco María)



Figura 25. Ensayo de resistencia a la compresión cilindros con 5% de cenizas de lodo a los 28 días. Nota. Fuente: Elaboración propia (Utria Marledys, Pacheco María)



Figura 26. Ensayo de resistencia a la compresión cilindros con 10% de reemplazo de cenizas de lodo a los 28 días. Nota. Fuente: Elaboración propia (Utria Marledys, Pacheco María)